



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

## ENERGOPILOTY

ENERGY PILES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivana Buzgóová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ BOŠTÍK, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Ivana Buzgóová
Název	Energopiloty
Vedoucí práce	Ing. Jiří Boštík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Podklady k bakalářské práci byly studentce předány zvlášť.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Piloty, jako prvky hlubinného založení stavebních konstrukcí v posledních letech neplní jen statickou funkci, ale i funkci tepelného výměníku využívajícího geotermální energii z podloží. Kumulace těchto funkcí může s sebou přinášet i jistá rizika ovlivňující primární, tj. statickou funkci piloty.

Bakalářská práce (BP) bude zaměřena na získání poznatků o chování osově zatížených energetických pilot. Bude provedena rešerše publikovaných prací, na základě které by:

- 1) měl být podán přehled o faktorech ovlivňujících chování energetických pilot a okolní základové půdy a přehled o metodách/způsobech, které byly používány pro studium jejich chování (experimentální testování a numerické modelování),
- 2) měl být podán přehled o výsledcích publikovaných studií (viz bod 1),
- 3) měla být uvedena diskuze/komentář k předchozím bodům.

Dále se předpokládá, že se studentka v rámci zpracování BP seznámí s programem Plaxis a případně provede jednoduchou numerickou analýzu chování energopiloty.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Jiří Boštík, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

---

## **ABSTRAKT**

V prvej časti bakalárskej práce je vysvetlený pojem energopilóta a zároveň sú podané základné informácie o využití geotermálnej energie, montáži, návrhu a o celkovom fungovaní tohto systému. Samostatná kapitola rieši problematiku správania osovo zaťažených energetických pilót, ktoré sú oproti klasickým základovým konštrukciám navyše namáhané teplotou. Následne sú uvedené faktory ovplyvňujúce správanie energopilót, okrem toho, sú popísané metódy skúmania (analytické, experimentálne aj numerické) a charakteristiky i výsledky konkrétnych štúdií, ktoré boli prevedené v rôznych častiach sveta za rôznych podmienok. V druhej časti práce je dôkladne opísaná jednoduchá numerická simulácia energetickej pilóty prevedená v programe Plaxis 2D. Je predstavený vytvorený model, výpočtové fázy aj rozbor získaných výsledkov a ich porovnanie s publikovanými štúdiami.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Energetická pilóta, geotermálna energia, osovo zaťažené pilóty, experimentálne vyšetrovanie, numerické modelovanie, Plaxis 2D

## **ABSTRACT**

In the first part of bachelor thesis, a concept of energy pile is explained and also basic information about usage of geothermal energy, montage of pile, its design and the overall operation of the system is shown. Behaviour of axially loaded energy piles is observed in the individual section. In contrast with other foundation structures, energy piles are also under thermal loading. Next, the main factors of pile behaviour are mentioned, the methods of investigation of energy piles (analytical, experimental and numerical) are described and also characteristics, results from the specific studies that were made in different parts of the world under various conditions. In the second part of the thesis, a simple numerical analysis of energy pile is carried out. The simulation of pile is performed in Plaxis 2D. The description of model, calculation phases are discussed along with achieved results and compared with published studies.

## **KEYWORDS**

Energy pile, geothermal energy, axially loaded piles, experimental testing, numerical modelling, Plaxis 2D

---

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

Ivana Buzgóová *Energopiloty*. Brno, 2021. 75 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Jiří Boštík, Ph.D.

---

---

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Energopiloty* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Ivana Buzgóová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Energopiloty* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Ivana Buzgóová  
autor práce

---

---

## **POĎAKOVANIE**

Chcela by som poďakovať vedúcemu tejto bakalárskej práce Ing. Jiřímu Boštíkovi, Ph.D. za cenné rady a pripomienky pri tvorbe záverečnej práce. Nesmierna vďačnosť za podporu počas štúdia patrí aj mojej rodine, partnerovi a priateľom.

---

---

## Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	Energetické pilóty.....	11
2.1	Popis konštrukcie .....	11
2.2	Dimenzovanie a návrh.....	13
2.3	Montážny postup .....	14
2.4	Termo-aktívne okruhy obsahujúce energetický základ.....	16
2.5	Príklady konštrukcií v Českej republike .....	17
3	Osovo zaťažené energetické pilóty.....	19
3.1	Mechanizmus prenosu zaťaženia .....	19
3.2	Matematický popis .....	22
4	Faktory vplývajúce na správanie energopilót.....	24
4.1	Okolité zemné prostredie .....	24
4.2	Pilóta.....	25
5	Metódy skúmania a publikované štúdie .....	33
5.1	Analytické metódy .....	33
5.2	Experimentálne metódy.....	34
5.2.1	Laboratórne merania .....	34
5.2.2	In situ experimenty.....	36
5.3	Numerické metódy .....	40
5.3.1	Metóda prenosových funkcií (Load-transfer method) .....	40
5.3.2	Metóda konečných prvkov (Finite element method) .....	43
5.3.3	Dostupné štúdie.....	45
5.4	Chronologický prehľad vybraných štúdií.....	49
6	Numerická simulácia .....	51
6.1	Matematický model.....	51
6.1.1	Parametre matematického modelu .....	51
6.1.2	Výpočtové fázy .....	53
6.2	Metodika výpočtu.....	54
6.3	Získané výsledky.....	55
6.3.1	Namáhanie teplotou - ohrievaním .....	55



---

6.3.2	Čiastočne obmedzená energopilóta.....	61
6.3.3	Cyklické termo-mechanické namáhanie .....	64
7	ZÁVER.....	67
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	69

---

## 1 ÚVOD

S aktuálnymi zmenami klimatických podmienok je trend znižovania uhlíkovej stopy a hľadanie alternatív fosílnych palív naozaj diskutovanou témou vo svete a zároveň významným cieľom budúcnosti. Snaha spočíva v nachádzaní iných spôsobov výroby či redukcii použitej energie. Veľký potenciál v odvetví ekologickejších alternatív a obnoviteľných zdrojov energie môžu mať práve energetické pilóty.

Geotermálna energia čerpaná z podlažia je jedným z obnoviteľných zdrojov energie, ktorou je možné disponovať. Energetické pilóty ako prerušované zásobníky geotermálnej energie sú súčasne aj prvkami hlbinného zakladania. Využitím základových konštrukcií ako energetických zásobníkov je možné znížiť emisie oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) novej stavby až o 50 % [1]. Na druhej strane je dôležité dostatočne overiť reálne správanie takýchto konštrukcií a ich vplyv na okolité podlažie či životnosť, zároveň je potrebné venovať pozornosť nedostatkom, ktoré takéto systémy môžu prinášať.

Cieľom tejto práce je podať prehľad o doterajších znalostiach v oblasti správania pilót namáhaných mechanickým ale aj tepelným zaťažením súčasne, o faktoroch vplyvujúcich na toto správanie či rôznych metódach skúmania energetických pilót.

V konečnom dôsledku overiť fungovanie energetického základu jednoduchou simuláciou a oboznámiť sa tak s programom Plaxis 2D. Predstaviť zjednodušenú metodiku modelovania takejto úlohy, popísať použité parametre modelu a previesť odbornú diskusiu na základe získaných výsledkov.

## 2 Energetické pilóty

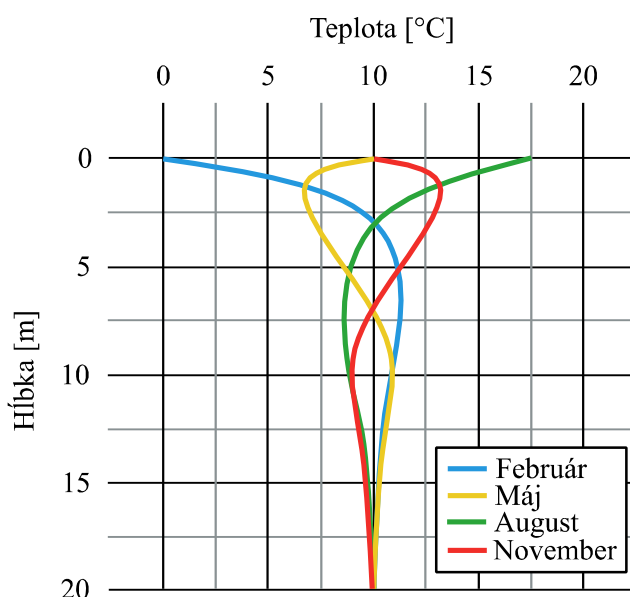
Pojem energopilóta pomenúva konštrukciu, ktorá v sebe ukrýva obrovský potenciál z hľadiska využitia geotermálnej energie, zatiaľ čo plní aj funkciu základového prvku.

### 2.1 Popis konštrukcie

Pilóty sú známe ako prvky hlbinného zakladania a plnia statickú funkciu, sú tak schopné podporovať stavebné dielo i prenášať zaťaženie z hornej stavby do podlažia [2]. Ich využitie je príznačné pri zakladaní výškových budov alebo pri zakladaní v lokalitách s málo stabilným podlažím či v miestach s výskytom podzemnej vody. Môžu mať charakter malopriemerových ako aj veľkopriemerových pilót a siahajú až do hĺbok 30 m pod úroveň terénu [3].

Z geologického hľadiska je možné rozlišovať povrchovú, podpovrchovú a hlbokú oblasť. Povrchová oblasť siaha približne do hĺbky 1 m, vlastnosti podlažia sú tu silno ovplyvňované klimatickými zmenami. Podpovrchová oblasť siaha do hĺbok od 1 m do 8 m pre suchšie ľahké zeminy a asi do hĺbky 20 m pri zeminách ťažkého vlhkého pieskového charakteru. Teploty v tejto časti sú viac ustálené a približujú sa ročným teplotám ovzdušia v danej geografickej oblasti. Oblasť veľkých hĺbok začína od 8 m, resp. 20 m, kde sú teploty konštantné a len pomaly narastajú s hĺbkou [4]. Priestor konštantných teplôt je možné zúžitkovať na inštaláciu nielen energetických pilót ale aj kolektorov či sond zemného tepla [5].

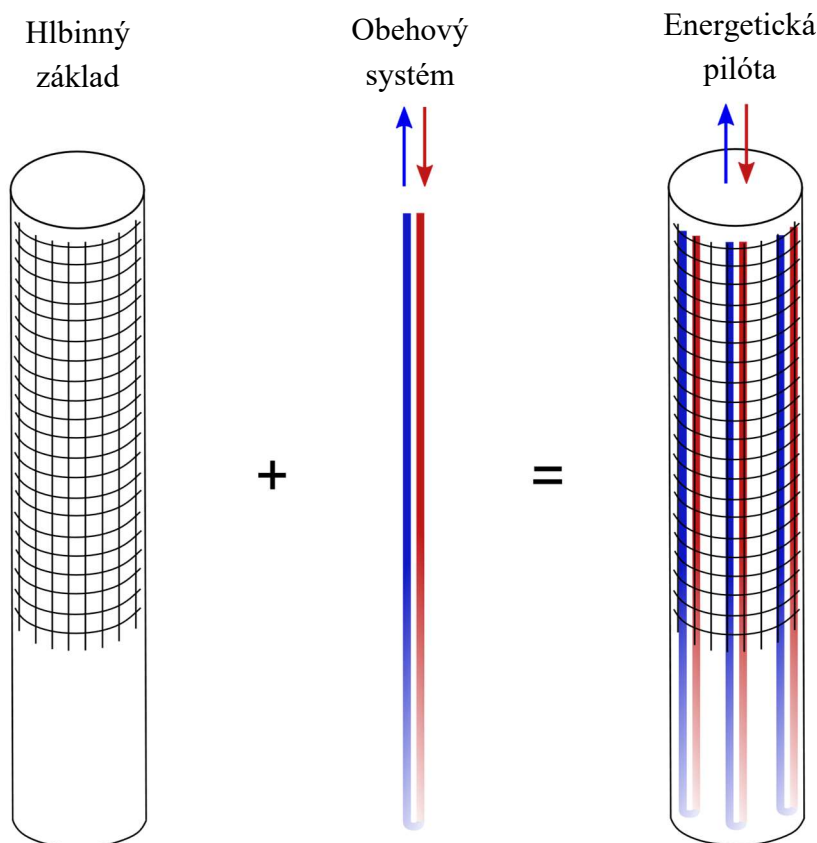
Obrázok 2.1 popisuje priebehy teplôt do hĺbky 20 m v rôznych obdobiach v priebehu roka. V hĺbke 1,2 m až 1,5 m sú tak teploty v rozmedzí 7-13 °C, celoročnú teplotu asi 10 °C je možné pozorovať v hĺbke približne 18 m pod úrovňou terénu. Všeobecný poznatok hovorí, že každých 100 m stúpne teplota asi o 2 °C až 3 °C. V hĺbke 100 m sa tak teploty pohybujú okolo 12 °C a v hĺbke 200 m približne v hodnotách okolo 15 °C [5].



Obrázok 2.1: Priebeh teplôt v podlaží v závislosti na hĺbke [5].

---

Vystrojením pilóty systémom plastových potrubí (pozri obrázok 2.2) s následným pripojením tepelného čerpadla sa dokázu energetické pilóty podieľať na vytápaní aj ochladzovaní objektu [6].



Obrázok 2.2: Podstata energopilóty [7].

Počas topnej sezóny fungujú pilóty na princípe ohrevu, kedy extrahujú teplo z podlažia a prostredníctvom teplonosnej tekutiny v systéme potrubí ním zásobujú stavbu. Naopak, v období tepla fungujú v reverznom nastavení a teplo je z nadzemnej časti stavby odvádzané do podlažia. Takýto systém využíva elektrickú energiu iba na presun tepla z jedného miesta na druhé, zatiaľ čo iné systémy ju využívajú priamo na tvorbu tepla [8]. Oproti klasickým systémom sú teda výhodnejšie z hľadiska ekonomiky, flexibility a dlhodobej udržateľnosti [9].

Vhodnými základovými konštrukciami na termickú aktiváciu sú vŕtané monolitické pilóty zabetónované priamo na stavenisku, prefabrikované betónové pilóty ale aj pilóty vŕtané špirálou (metóda CFA) [6].

Konštrukciu tvorí hlbinný vrt vystužený armovacím košom podľa statického návrhu, medzipriestor tvorí betón [3]. Tieto prvky zakladania však navyše obsahujú plastové potrubia, prevažne z vysokohustotného polyetylénu (HDPE), v jednej alebo viac slučkách po svojej dĺžke [10]. Energetické pilóty sú tvorené potrubnou sieťou vyrábanou mimo staveniska v uzavretých slučkách, čo znamená, že potrubie je naplnené tekutinou zabezpečujúcou transfer tepla. Obvyklou tekutinou je voda, prípadne doplnená

o nemrznúcu zmes, biocídny či korózný inhibítor [11]. Potrubia bývajú navyše vybavené uzatváracím ventilom a manometrom, slúžiacim na meranie tlaku, umiestneným na vrchole armokoša pilóty [10].

Tieto konštrukcie sú navrhované samozrejme iba tam, kde ju nutné založenie na pilótach. Zo statického hľadiska existuje nutný počet pilót pre dané stavebné dielo, ten je zohľadnený a dodržaný kvôli ekonomickej stránke stavby [2]. Návrh takéhoto systému je možný len v prípade novostavieb, akékoľvek dodatočné osadenie potrubí do základov nie je možné prevádzať [3].

## 2.2 Dimenzovanie a návrh

Pre zostavenie adekvátnej konštrukcie je dôležité poznať geologické pomery lokality, určiť druh betónu na vnútro pilóty, priemer pilóty a jej dĺžku v závislosti na zaťažení, ktorému musí konštrukcia základov odolávať. Následne je potrebné zvážiť vhodné rozmiestnenie pilót. Vo väčšine prípadov pokrývajú navrhnuté pilóty celkovú energetickú náročnosť budovy, ak sa tak nestane, je možné ich skombinovať s hlbinnými vrtmi [12].

Pri návrhu energopilót je nutné uvažovať všetky potrebné parametre ako pri výpočte klasických pilót, navyše je nutné kvantifikovať zaťaženie od teploty. Dodatočné úvahy u energopilót pri návrhu na medzný stav únosnosti (ULS) a medzný stav použiteľnosti (SLS) udáva tabuľka 2.1 [11].

Tabuľka 2.1: Porovnanie návrhových pohľadov pre pilóty a energetické pilóty [11].

Pilóty	Energetické pilóty
<p>ULS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stratigrafia a parametre podlažia</li> <li>Šmykové/osové napätia</li> <li>Uloženie koncov pilóty</li> </ul> <p>SLS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sadnutie pilóty</li> <li>Rozdielové sadnutie</li> <li>Napätie v betóne</li> <li>Záporné plášťové trenie</li> </ul>	<p>ULS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pevnostné charakteristiky zeminy s ohľadom na proces ohrievania/ochladzovania</li> </ul> <p>SLS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Osová a radiálna expanzia/kontrakcia pilóty</li> <li>Osové napätia od teploty</li> <li>Cyklické tepelné namáhanie</li> <li>Teplota na rozhraní podlažie-pilóta (denná/sezónna)</li> </ul>

Thermal Response Test (TRT) je najčastejším typom in situ testu (prevedenom na pôvodnom mieste) pre zistenie teplotných pomerov a tepelnej vodivosti v podlaží, ktoré determinujú návrh a dimenzovanie energetických pilót. Cieľom jeho prevádzania je zvýšiť presnosť návrhu a optimalizovať účinnosť tepelného čerpadla. Vhodným riešením je prevádzať TRT na predbežnej skúšobnej pilóte, aby bola dosiahnutá rovnováha medzi pilótou a okolitým prostredím pred testovaním, zároveň boli všetky zistenia zapracované do návrhu skutočnej konštrukcie [11]. Pri štandardom TRT, ohrievaná tekutina prúdi v skúšobnom vrtnom výmenníku tepla a poskytuje tak výstupné hodnoty testu ako sú:

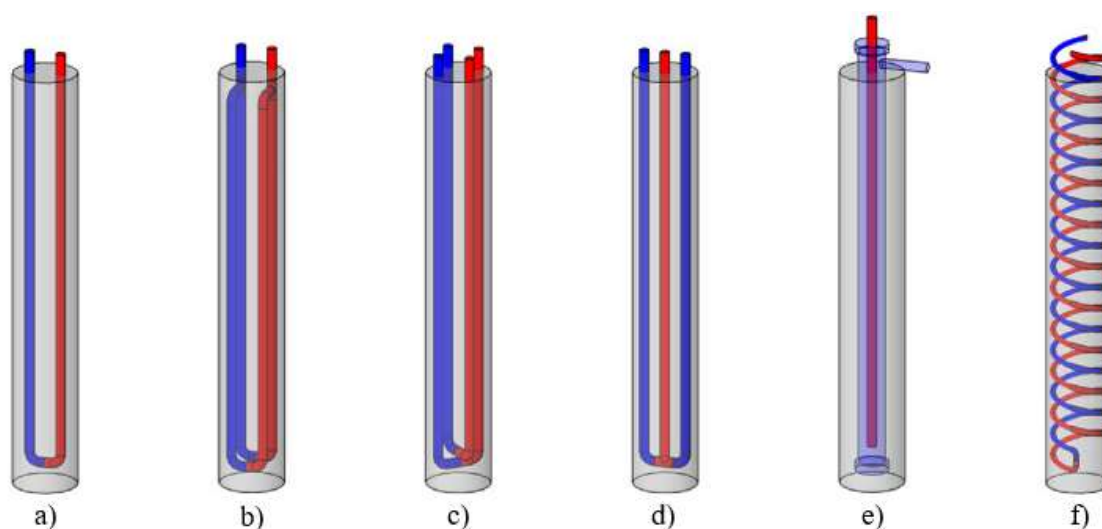
---

tepelná vodivosť podložia, tepelný odpor vrtu a teplota podložia. Thermal Response Test je vhodným nástrojom hlavne pre väčšie stavby, inak je jeho využitie neekonomické [13].

### 2.3 Montážny postup

Montáž energetickej pilóty je možné popísať v štyroch základných montážnych krokoch.

V prvom kroku, osadení potrubia, je nutné mať pripravený armovací kôš, ktorý okrem vystuženia pilóty, slúži aj na uloženie potrubia. Pokladanie je možné previesť niekoľkými spôsobmi (pozri obrázok 2.3) – sonda U a jej kombinácie, multitube, zarážaná pilóta či špirála [12]. Ďalej aj iné ako napríklad sonda W alebo meandrové uloženie. Trubice je vždy potrebné silovo upevniť na výstuž, upevnenie je nutné i v pásmach zmeny smeru (v oblúkoch) [5].

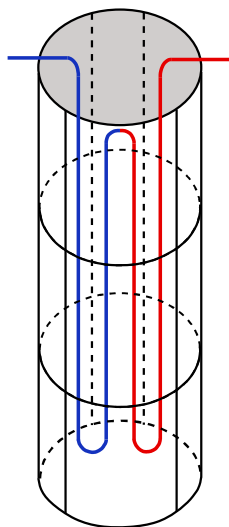


Obrázok 2.3: Niektoré možné spôsoby uloženia potrubia v energetickej pilóte: a) jednoduchá sonda U, b) dvojité sonda U rovnobežná, c) dvojité sonda U priečna, d) multitube, e) zarážaná pilóta, f) špirála [14].

Pri prvom spôsobe uloženia sa trubice uložia do slučky v tvare písmena U a je možné ich aj kombinovať (dvojité a trojitá verzia či rovnobežné alebo priečne uloženie). V hlave pilóty je ale potrebné zabezpečiť prepojenie týchto slučiek vhodným spôsobom. Najväčšou výhodou pri U uložení sú minimálne hodnoty tlakových strát, no naopak ich inštalácia je značne finančne náročná. Tento spôsob je často využívaný pri experimentálnych meraniach (pozri kapitolu 5). Zarážaná pilóta je relatívne novým spôsobom vystrojenia energetickej pilóty. Trubička je v tomto prípade zarazená do požadovanej hĺbky, vybavená naviac zemnou sondou a zainjektovaná. Inovatívny spôsob je nekomplikovaný a zároveň efektívny. Najpoužívanejším spôsobom ukladania potrubia je špirála, ktorá má viacero výhod, prednosťami je krátka doba inštalácie, nízke finančné náklady a celková funkčnosť. Pri tomto uložení sa potrubie inštaluje po vnútornom obvode armovacieho koša v jednotnom stúpaní, je však možné ho použiť iba pre väčšie dimenzie pilót [12]. Tento spôsob uloženia zvyšuje účinnú plochu, ktorou nastáva výmena tepla, a tak vykazuje najlepšiu výkonnosť v šírení tepla. Pri uložení do tvaru písmena W ide o akýsi

---

derivát sondy U so zvýšeným počtom potrubí (pozri obrázok 2.4). Je tak možné efektívne zvýšiť transport tepla [15].



Obrázok 2.4: W-sonda [16].

Pri meandrovom uložení sú trubice do armovacieho koša pokladané v nekonečných slučkách po výške pilóty (vertikálne), oblúky sú vždy v hlave a v päte pilóty (pozri obrázok 2.5). Výraznou prednosťou tohto spôsobu je jednoduchá montáž, zároveň je aj najpoužívanejším spôsobom pre pilóty menších priemerov [12].



Obrázok 2.5: Meandrovité uloženie potrubia [17].

V druhom kroku montáže sa v hlave pilóty napája vedenie potrubia, ktoré je nutné skrátiť a vybaviť chráničkou. Ďalej je žiadúce označiť energetickú pilótu podľa konkrétneho montážneho plánu [5].

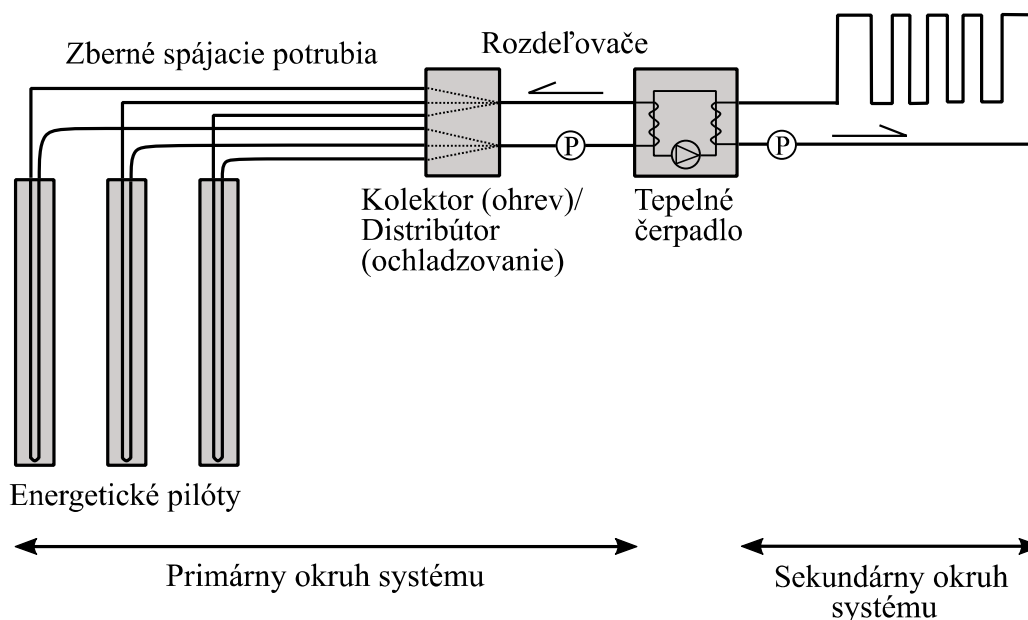
V nasledujúcom kroku je potrebné previesť skúšanie tlaku manometrom – po umiestnení jednotky na skúšanie je nutné nastaviť hodnotu skúšobného tlaku na 6 barov a následne zapísať hodnotu tlaku do protokolu [5].

V poslednom kroku dochádza k betonáži pilóty, po jej dokončení je žiadúce uskutočniť druhú skúšku tlaku a hodnotu opäť zapísať do protokolu. Nakoniec nastáva pripojenie pilóty na rozvodné potrubie, prípadne na rozdeľovač topného alebo chladiaceho okruhu [5].

## 2.4 Termo-aktívne okruhy obsahujúce energetický základ

Výmena tepla medzi pilótou a podlažím závisí na energetickej náročnosti budovy, koľko tepla sa spotrebuje na ohrev v zimných mesiacoch a koľko tepla sa odoberie v teplejších mesiacoch.

Tento termo-aktívny systém pozostáva z primárneho a sekundárneho okruhu, pričom primárny okruh tvoria časti uložené pod úrovňou zemského povrchu, sekundárny je zložený z prvkov nachádzajúcich sa v nadzemných častiach. Tieto okruhy sú vzájomne prepojené tepelným čerpadlom (pozri obrázok 2.6). Primárny okruh tvoria potrubia uložené v základových konštrukciách – napr. pilótach, ktoré sú v kontakte s okolitým podlažím. Často sa používajú aj iné energetické konštrukcie ako napríklad základové dosky či podzemné steny. Pomocou týchto potrubí je čerpaná teplonosná tekutina, ktorá vymieňa energiu medzi nadzemnou stavbou a konštrukciami v podlaží. Po vybetónovaní základového prvku sa prečnievajúce časti potrubia pripoja do zberača (pre ohrievanie) resp. do rozdeľovača (pre ochladzovanie) a pripoja sa k tepelnému čerpadlu pomocou spájacích trubíc. Sekundárny okruh je tvorený uzavretou sieťou ohrevu alebo chladenia uloženou v podlahách a stenách budov alebo v mostných doskách, v konštrukciách ciest či nástupíšť, podľa toho o akú nadzemnú stavbu sa jedná. Tepelné čerpadlo dokáže zvýšiť tepelnú hladinu z 10-15 °C na hodnoty až okolo 25-35 °C. Celý proces čerpania tepla využíva relatívne malé množstvo elektrickej energie a je možné ho prirovnať k fungovaniu akejsi reverznej chladničky, avšak v prípade tepelného čerpadla, dochádza k absorpcii tepla vo výparníku aj emisii tepla v kondenzátore pri vyššej teplote, nastáva využitie princípu ohrevu, nie ochladzovania [18].



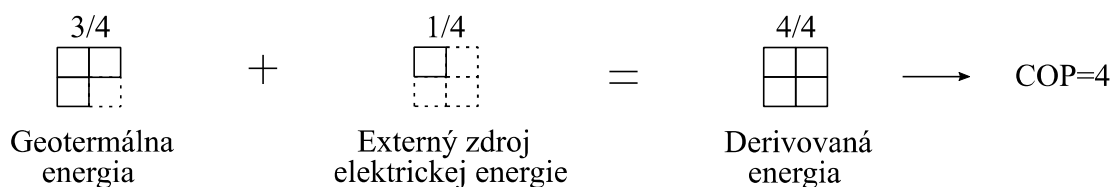
Obrázok 2.6: Schéma celkového prepojenia a fungovania energopilót (primárneho okruhu) s tepelným čerpadlom a následným pripojením na sekundárny okruh [18].



Tepelné čerpadlo je definované bezrozmerným koeficientom výkonnosti COP, inak nazývaným aj vykurovací/ohrievací faktor, ktorý hovorí o efektívnosti čerpadla a je daný nasledujúcim pomerom:

$$COP = \frac{\text{energia dodaná tep. čerpadlom [kW]}}{\text{energia na chod tep. čerpadla [kW]}} \quad (2.1)$$

Na obrázku 2.6 je znázornená schéma pripojenia primárneho a sekundárneho okruhu, ktorej COP má hodnotu 4, čo znamená, že jednu zo štyroch častí elektrickej energie tvorí tá z externého elektrického zdroja a ďalšie tri diely sú tvorené geotermálnou energiou z podlažia, celkovo sú odvodené 4/4 použitej energie (pozri obrázok 2.7). Efektívnosť tepelného čerpadla je ovplyvnená rozdielom medzi skutočne použitým a extrahovaným teplom. Z ekonomického hľadiska je vhodné dosiahnuť hodnoty  $COP \geq 4$  [18].



Obrázok 2.7: Vysvetlenie COP faktora [18].

SPF ako sezónny vykurovací faktor podľa rovnice 2.2 predstavuje priemernú hodnotu COP a okrem tepelného čerpadla popisuje aj ďalšie energeticky náročné prvky akými sú napríklad obehové čerpadlá. Hodnoty pre SPF sú bezrozmerné a pre štandardné čerpadlá sa pohybujú v rozmedzí 3,8 až 4,3 [18].

$$SPF = \frac{\text{teplo vydané systémom [kWh]}}{\text{celková energia dodaná do systému [kWh]}} \quad (2.2)$$

Hlbšie systémy majú viac výhod pretože ich energetický potenciál narastá s hĺbkou. Pilóty a iné energetické základové konštrukcie je hospodárne navrhovať od dĺžky 6 m, inak nie sú hĺbkou obmedzené [10]. Energopilóty je vhodné využívať celoročne na princípe chladenia aj ohrievania podľa aktuálnej sezóny. Užívanie iba jedného systému by bolo ekonomicky aj ekologicky nevýhodné a ťažko uskutočniteľné [3].

## 2.5 Príklady konštrukcií v Českej republike

Existuje viacero stavieb, kde boli prevedené energetické pilóty, prípadne energetické základy iného typu. Jedná sa o stavby väčšieho i menšieho rozsahu, kde je možné tieto prvky aplikovať. Pre názornosť sú uvedené dva zaujímavé projekty práve v Českej republike. Oba tieto geotermické inštalácie prevádzala spoločnosť GEROTop spol. s r.o. Česká republika.

Prvým projektom, kde boli použité energopilóty v Českej republike bol objekt 12 LOFTS v Bubenci, objekt loftových bytov v luxusnej časti, Praha 6 (pozri obrázok 2.8).

---

Pod stavbou sa nachádza až 78 pilót, najdlhšia má hĺbku 13 m. Systém bol navyše doplnený aj o základovú dosku, kde bolo spolu s pilótami aplikovaných 7,2 km potrubí [19].



Obrázok 2.8: 12 LOFTS, Bubeneč, Praha [20].

Princíp energetických pilót bol využitý aj pri stavbe najvyššej budovy v Českej republike – AZ Tower v Brne (pozri obrázok 2.9). Patrí medzi najmodernejšie multifunkčné objekty v krajine, je vysoká až 111 m a výstavba bola dokončená v roku 2013. Návrh geotermie bol prevádzaný v období, keď bola projektová časť takmer vo svojej finálnej verzii. O to unikátnejší tento projekt je, keďže sa s inštaláciou energetických základov najprv neuvažovalo [21]. Finálne sa v podlaží budovy AZ Tower nachádzajú pilóty hlboké až 30 m a potrubia o dĺžke asi 10 km, ktoré majú, spolu s tepelnými čerpadlami, na starosti prevažnú časť vytápania aj chladenia budovy. Podľa vykonanej štúdie uskutočniteľnosti sa uvažovalo s návratnosťou systému v rozmedzí 5 až 7 rokov [22].



Obrázok 2.9: AZ Tower v Brne [23].

---

### 3 Osovo zaťažené energetické pilóty

Každá konštrukcia reaguje na rôzne typy namáhania, snahou je doceliť predovšetkým bezpečnosť konštrukcie počas jej životnosti. Osovo zaťažená energetická pilóta je namáhaná vertikálnou silou v rovine svojej osi a zároveň pôsobením zmeny teploty, kedy môže dochádzať k prípadu ohrievania alebo ochladzovania. Popis správania takejto pilóty je v súčasnosti atraktívnou oblasťou geotechniky.

#### 3.1 Mechanizmus prenosu zaťaženia

Pri stavebných konštrukciách je dôležité dbať na únosnosť konštrukčného prvku. U pilót je únosnosť definovaná ako maximálna hodnota zaťaženia, pri ktorom je pilóta ešte schopná odolávať vystaveným podmienkam či už podmienkam pevnostným alebo deformačným z okamžitého i z dlhodobého hľadiska [24].

Zaťaženie sa u pilót prenáša do podložia dvoma spôsobmi: trením na plášti pilóty a/alebo päťou pilóty. Podľa spôsobu prenosu zaťaženia je možné pilóty rozdeliť na: plávajúce (trecie), opreté a votknuté. Plávajúce pilóty nedosahujú na únosnú vrstvu podložia, opreté pilóty sú uložené v nestlačiteľnom podloží a je umožnený ich vodorovný posun, u votknutých pilót je zamedzené zvislému aj vodorovnému posunu [25]. U stlačiteľných a poloskalných typov podložia je zaťaženie prenášané na plášti aj v päte pilóty. Nestlačiteľné vrstvy podložia a skalné prostredie umožňujú prenos zaťaženia len prostredníctvom päty pilóty.

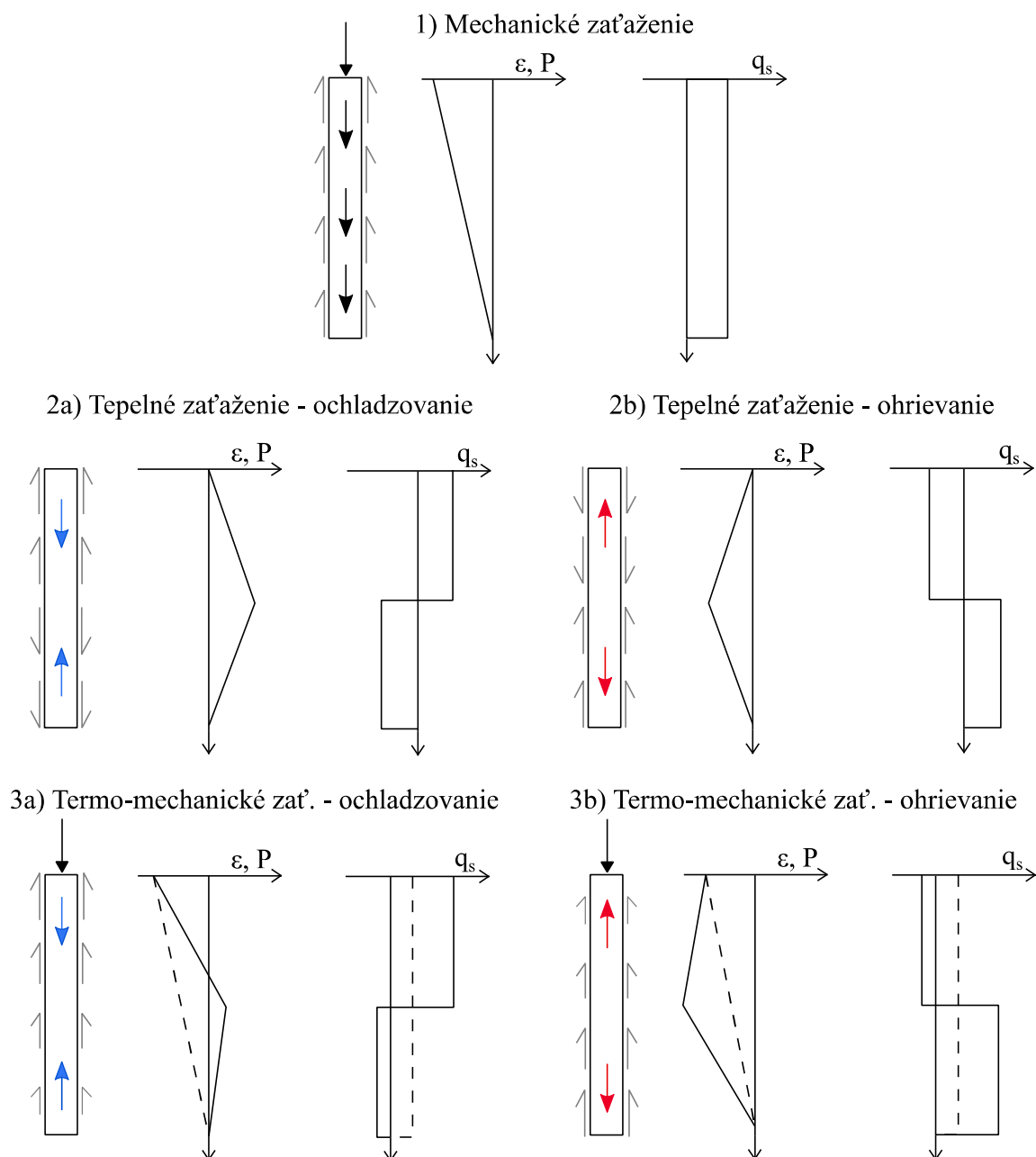
Dôležitým faktorom pri popise správania energetických pilót je spôsob, akým sú obmedzené koncové časti pilóty. V prvej časti je zobrazené a popísané pôsobenie energopilóty, ktorá nemá obmedzené koncové časti – hlavu a päť pilóty (pozri obrázok 3.1), predpokladá sa rovnomerné rozloženie zmeny teploty po dĺžke a expanzia alebo kontrakcia nastáva približne v polovici hĺbky vrtu. Obrázok 3.1 zobrazuje závislosti pre osové pretvorenie pilóty označené  $\epsilon$ ,  $P$  predstavuje osovú silu v pilóte a  $q_s$  reprezentuje šmykové napätie na rozhraní plášťa pilóty a podložia. Tieto veličiny sú zobrazené v závislosti na hĺbke pilóty. Pre takýto prvok môžu nastať nasledujúce spôsoby namáhania [26]:

- Mechanické zaťaženie – Ak na pilótu pôsobí len mechanické zaťaženie, táto pilóta je zatlačovaná do podložia. Mobilizované trenie na plášti bráni zatlačovaniu, a preto má opačný smer ako efekt, ktorý spôsobí samotné zaťaženie. Pretvorenie sa znižuje s narastajúcou hĺbkou a trenie na plášti je konštantné (pozri obrázok 3.1-1).
- Tepelné zaťaženie – ochladzovanie – Pri pôsobení ochladzovania nastane zmršťovanie pilóty. Keďže mobilizované trenie na plášti bráni tomuto pohybu, v pilóte dôjde k vývinu ťahových pretvorení, ktoré môžu viesť k porušeniu prvku. Plášťové trenie je mobilizované v hornej časti drieku pilóty v rovnakom smere ako v prípade 3.1-1 a v smere opačnom v dolnej časti drieku pilóty (pozri obrázok 3.1-2a).

- 
- Tepelné zaťaženie – ohrievanie – V prípade pôsobenia ohrievania je pilóta schopná dilatovať. Obmedzenie na rozhraní podložie-pilóta (trenie na plášti) vedie k vzniku dodatočných tlakových pretvorení v pilóte, ktoré je nutné zahrnúť v návrhu materiálu použitého na betonáž pilóty. Priebeh trenia na plášti má reverzný charakter oproti priebehu pre proces ochladzovania (pozri obrázok 3.1-2b).
  - Termo-mechanické zaťaženie – ochladzovanie – Pri pôsobení mechanického zaťaženia a zmeny teploty súčasne, dochádza ku kombinácii týchto efektov podľa obrázku 3.1-3a. Mení sa charakter osového zaťaženia – je menej tlakové a môže mať až ťahový charakter v nižších častiach pilóty. Ďalej nastáva nárast mobilizovaného plášťového trenia v hornej časti drieku pilóty a naopak, dochádza k jeho poklesu v spodnej časti.
  - Termo-mechanické zaťaženie – ohrievanie – V tomto prípade analogicky dochádza k spojeniu pôsobenia podľa obrázkov 3.1-1 a 3.1-2b. Osové zaťaženie môže mať viac kompresný charakter a mobilizované plášťové trenie narastá v spodnej časti drieku pilóty, zatiaľ čo klesá vo svojej hornej časti (pozri obrázok 3.1-3b) [26].

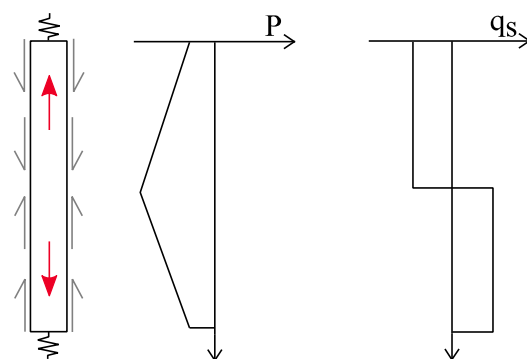
Mobilizácia plášťového trenia spôsobí nadvihnutie hlavy pilóty počas fázy ohrievania a pokles počas procesu ochladzovania [11]. V počiatočnej fáze prenáša päta pilóty len malé zaťaženie, dôvodom je relatívne malá plocha päty v porovnaní s plochou plášťa pilóty. Hodnota aktivovaného napätia býva taktiež neveliká, jej rast je spôsobený až ďalším sadaním hornej stavby, a tým zatlačovaním pilóty [24].

Podľa doterajších výskumných prác bolo zistené, že zmena teploty energopilóty vplýva na rozhranie podložie-pilóta a zároveň spôsobuje zmeny v napätí pozdĺž pilóty, ale aj zmeny v posune hlavy pilóty [27].

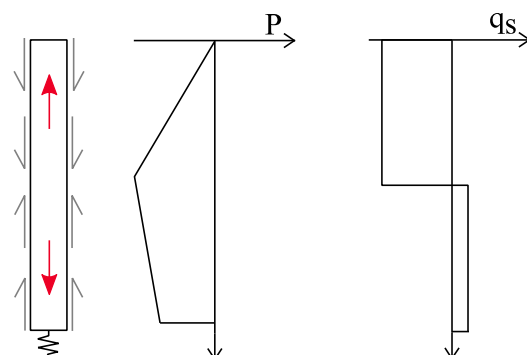


Obrázok 3.1: Možnosti zaťaženia energetickej pilóty bez obmedzenia posunov v hlave alebo v päte pilóty [26].

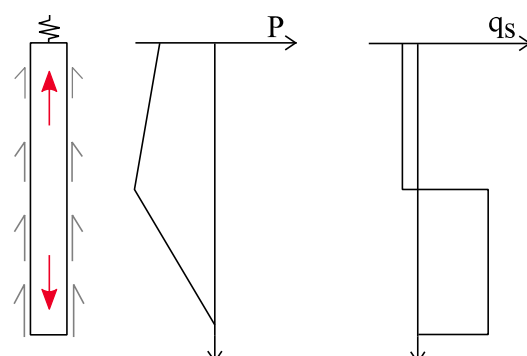
Vysvetlené správanie môže byť modifikované zmenou zamedzenia na koncoch pilóty. Preto v ďalšej časti uvádza obrázok 3.2 možnú podobu priebehov pre pilótu namáhanú tepelne – ohrievaním v prípade rôznych obmedzení, v hlave a v päte pilóty. Jedná sa o priebehy plášťového trenia na rozhraní podlažie-pilóta označovaného  $q_s$  a osovej sily v pilóte  $P$ , oba v závislosti na hĺbke energopilóty. Pri obmedzení na jednotlivých koncoch pilóty v nej vznikajú dodatočné osové napätia, a tak vzťah medzi napätím a pretvorením závisí na relatívnej tuhosti obmedzení na jednotlivých koncoch [27]. Nastáva tiež nárast plášťového trenia na tzv. voľných (neobmedzených) koncoch pilóty. V prípade pilóty namáhanej opačným tepelným procesom – ochladzovaním – by boli tieto priebehy inverzného charakteru.



a) Zamedzenie v hlave aj v päte pilóty



b) Zamedzenie len v päte pilóty



c) Zamedzenie len v hlave pilóty

Obrázok 3.2: Princíp prenosu tepelného zaťaženia pre ohrievanú pilótu s rôznym typom obmedzenia [11].

### 3.2 Matematický popis

Pilóta zaťažená iba pracovným zaťažením, ktorá je následne ohriata alebo ochladená, sa správa podľa ďalších podmienok podložia a spôsobu uloženia jej koncov.

Ak je pilóta charakterizovaná ako voľne stojaci prút, nie je zaťažená v jej hlave a následne prebehne zahrievanie, tak sa pilóta začne rozpínať. Expanduje podľa teplotných charakteristík, ktoré narastajú podľa rovnice 3.1:

$$\varepsilon_{T-Free} = \alpha_c \Delta T \quad (3.1)$$

kde  $\varepsilon_{T-Free}$  je tepelné osovú pretvorenie pre pilótu bez obmedzenia na jej koncoch (voľne stojaci prút),  $\alpha_c$  reprezentuje koeficient tepelnej rozťažnosti/zmršťovania materiálu pilóty a  $\Delta T$  popisuje zmenu teploty pilóty [28]. V nasledujúcej rovnici 3.2:

---


$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_M + \varepsilon_{T-Obs} \quad (3.2)$$

je  $\varepsilon_{Total}$  celkové osové pretvorenie pilóty pri termo-mechanickom zaťažení,  $\varepsilon_M$  je pretvorenie od mechanického zaťaženia a  $\varepsilon_{T-Obs}$  je pretvorenie od teploty odpozorované pri experimentálnom testovaní [27].

Avšak, pilóta umiestnená do zeminy nemôže voľne expandovať kvôli mobilizácii bočného trenia na rozhraní pilóty s podložíom a zároveň kvôli obmedzeniu v hlave a/alebo v päte pilóty [28]. Potom je miera zmeny pretvorenia voči zmene teploty získaná meraním, označovaná ako  $\varepsilon_{T-Obs}$ , menšia ako tá podľa rovnice 3.1 [28]:

$$\varepsilon_{T-Obs} \leq \varepsilon_{T-Free} \quad (3.3)$$

Obmedzené osové pretvorenie  $\varepsilon_{T-Rstr}$  môže byť definované ako:

$$\varepsilon_{T-Rstr} = \varepsilon_{T-Free} - \varepsilon_{T-Obs} \quad (3.4)$$

Pretvorenie  $\varepsilon_{T-Rstr}$  vytvára tepelné napätie v pilóte a je potrebné ho zohľadniť v návrhu [28]. Osové namáhanie spôsobené len zmenou teploty, pre daný prírastok pretvorenia k zmene teploty  $\Delta T$ , je možné vyčísliť pomocou nasledujúcej rovnice 3.5:

$$P_T = -EA\varepsilon_{T-Rstr} = -EA(\alpha_c\Delta T - \varepsilon_{T-Obs}) \quad (3.5)$$

kde  $E$  je Youngov modul pružnosti materiálu pilóty,  $A$  označuje prierezovú plochu pilóty a záporná hodnota v rovnici 3.5 znamená, že pretvorenie vyvolané vzájomným pôsobením na rozhraní podložie-pilóta vyvstáva proti smeru deformácie pilóty [28]. Celková sila vyvolaná termo-mechanickým namáhaním  $P_{Total}$  je daná rovnicou 3.6:

$$P_{Total} = P_M + P_T = EA(\varepsilon_{Total} - \alpha_c\Delta T) \quad (3.6)$$

kde  $P_M$  je sila vyvolaná mechanickým zaťažením [27].

---

## 4 Faktory vplyvajúce na správanie energopilót

Konstruktívne využívajúce geotermálnu energiu môžu poskytnúť stavbe benefity za malé finančné náklady s využitím energie z podlažia a prirodzených tepelne-vodivostných charakteristík betónu.

V minulosti sa ako zásobníky geotermálnej energie využívali vrty avšak, tie sú z hľadiska nákladov na vrtanie pomerne náročné. Energetické pilóty so svojím dvojakým charakterom dostačujúco zastupujú úlohu geotermálnych vrtov a preto je ich inštalácia čoraz obľúbenejšia [29].

Počas tepelného namáhania energetickej pilóty nastáva tepelná výmena medzi samotnou pilótou a okolitým prostredím vedúca k otepleniu alebo ochladeniu zeminy. Táto skutočnosť ovplyvňuje nielen mechanické ale aj fyzikálne správanie podlažia a pilóty, predovšetkým na ich spoločnom rozhraní [27].

Kľúčové parametre, ktoré ovplyvňujú šírenie tepla sú: geometria základového prvku (priemer, dĺžka pilóty), štrukturálne prvky (armovací kôš, materiál pilóty, vlastnosti materiálu pilóty (najčastejšie betón), charakteristika potrubia (počet prvkov, priemer potrubí, vzájomná vzdialenosť, typ uloženia), materiálové charakteristiky typu podlažia ale aj rozdiel počiatočných teplôt v podlaží či výskyt podzemnej vody. Z geotechnického aspektu ďalej záleží na zamedzení posunov koncových častí pilóty a aplikácií zaťaženia (mechanického aj tepelného) [30].

### 4.1 Okolité zemné prostredie

Dostatočná tepelná kapacita zeminy umožňuje využívanie energetických pilót. Prenos tepla nastáva na rozhraní podlažia a pilóty, kedy sú hodnoty ustálenej teploty v podlaží v zimnom období vyššie ako teploty ovzdušia a v letnom období nižšie [29]. Výmena tepla nastáva na priamom kontakte (podlažie - materiál pilóty - potrubie), čo spôsobí redukcii tepelného odporu [15].

Rýchlosť tepelného toku v pilóte je ovplyvnená tepelnou vodivosťou okolitej zeminy, preto je tepelná vodivosť zeminy dôležitým návrhovým faktorom pri tvorbe energetických pilót a prevažne závisí na hustote zeminy a obsahu vody v podlaží [27]. Prúdiaca podzemná voda dokáže udržiavať stálu teplotu zeminy. Podľa You a Yang [31] väčšia rýchlosť prúdenia podzemnej vody, štíhly tvar pilóty, väčšia vzájomná vzdialenosť pilót a menšia dĺžka pilót môžu zmierniť dlhodobé teplotné zmeny spôsobené nevyváženou výmenou tepla v podlaží. Pri nižšej rýchlosti prúdenia tekutiny v potrubíach majú spomínané parametre väčší vplyv na správanie vyvolané teplotou.

Pri obsahu vody 25-50 % narastá schopnosť podlažia distribuovať teplo, keďže dochádza k nárastu rýchlosti toku tepla. Čím väčšiu tepelnú kapacitu má podlažie, tým viac tepelnej energie je schopné prijať [15]. Tabuľka 4.1 udáva základné tepelné charakteristiky vybraných zložiek pôdy ovplyvňujúcich distribúciu tepla.



Tabuľka 4.1: Tepelné charakteristiky najbežnejších materiálov obsiahnutých v pôde [32].

Materiál	Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnostná tepelná kapacita $c$ [kJ/kg.K]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$ [W/m.K]	Tepelná difuzivita $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s] $\times 10^{-7}$
Vzduch (10 °C)	1,25	1,000	0,0026	0,21
Voda (25 °C)	999,87	4,200	0,56	1,43
Vodná para (1 atm, 400 K)	-	1,901	0,016	233,8
Ľad (0 °C)	917	2,040	2,25	12
Kremeň	2660	0,733	8,40	43,08
Žula	2750	0,890	1,70-4,00	~12
Sadrovec	1000	1,090	0,51	4,7
Vápenec	2300	0,900	1,26-1,33	~5
Mramor	2600	0,810	2,80	13
Sľuda	2883	0,880	0,75	2,956
Íl	1450	0,880	1,28	10
Pieskovec	~2270	0,710	1,60-2,10	10-13

Kolektív autorov (G. A. Akrouch, M. Sánchez, J.-L. Briaud) skúmal správania energetickej pilóty vo veľmi tuhých vysokoplastických íloch formou in situ testov. Boli aplikované rôzne hodnoty mechanického zaťaženia a zároveň namáhanie teplotou, vnesené cirkulovaním teplej vody v potrubiach. Jednalo sa teda o testy v chladnejších klimatických podmienkach, kde boli pozorované hodnoty osových pretvorení, teploty v pilóte a určená bola aj zaťažovacia krivka pilóty (závislosť medzi sadnutím a zaťažením). Merania poukázali na skutočnosť, že s narastajúcou teplotou sa zvýšila aj miera creep-ového správania energopilóty, to matematicky značí nárast exponentu viskozity a zároveň vývin dodatočným, časovo závislých posunov základovej konštrukcie. Využívanie energetických pilót spôsobilo vývin deformácií a zaťaženie od teploty spôsobených dilatáciou resp. kontrakciou pilóty avšak, tie boli málo významné.

Zároveň bola vytvorená extrapolovaná zaťažovacia krivka energetickej pilóty pre extrémny prípad, kedy by systém fungoval len na princípe ochladzovania, vykazovala až 2,35násobne väčšie dlhodobé sadnutie než klasická pilóta [33]. Pri návrhu energopilót v podobných podmienkach by malo byť cieľom zníženie dlhodobých sadnutí, ktoré je možné vyriešiť minimalizovaním sadnutí počiatočných.

## 4.2 Pilóta

Dôležitým faktorom z geotechnického aj energetického hľadiska je samotná konštrukcia pilóty. V tomto prípade môžu odozvu prvku ovplyvňovať rôzne charakteristiky pilóty (rozmery, materiál) ale aj potrubia v nej uložené (spôsob uloženia, priemery potrubí, rýchlosť prúdenia teplonosnej tekutiny ako aj jej zloženie) [15].

---

Najčastejším materiálom pilóty býva betón, jeho tepelnú vodivosť ovplyvňujú nasledujúce faktory:

- staroba betónu,
- objem frakcie kameniva,
- množstvo cementu,
- typy prímiesí,
- objem frakcie jemného kameniva,
- teplota,
- vlhkosť vzorky [34].

Najväčší vplyv z uvedených vlastností má najmä objem frakcie kameniva a vlhkosť [34].

Kolektív autorov (S. Park, CH. Sung, K. Jung, B. Sohn, A. Chauchois, H. Choi) previedol štúdiu, kde sa snažili formou in situ testov prezentovať aplikovateľnosť na mieste betónovaných pilót pomocou TRT testov. Jednalo sa o veľkopriemerové pilóty (priemer 1,5 m) s rôznymi typmi uloženia potrubných sietí – trojitá U-sonda paralelná (5, 8 a 10 párov), špirála so stúpaním 200 mm a 500 mm. Hodnoty pre TRT testy boli sledované prostredníctvom dvoch pozorovacích vrtov. Čím väčšiu dĺžku mali potrubia uložené v pilóte, tým väčšia bola efektivita tepelnej výmeny v závislosti na dĺžke pilóty. Podľa prevedeného merania sa najviac osvedčilo použitie špirálového uloženia potrubia – z energetického aj finančného hľadiska, keďže uloženie do špirály dokáže zväčšiť plochu, ktorou nastáva výmena tepla [35].

Komplexná štúdia autorov (N. Batini, A.F. Rotta Loria, P. Conti, D. Testi, W. Grassi, L. Laloui) predstavuje numerickú simuláciu správania energopilóty pre rôzne nastavenia rozličných parametrov, boli pozorované:

- rôzne usporiadania potrubí,
- rôzny pomer jednotlivých rozmerov základovej konštrukcie,
- rozdielne prietoky vody v potrubí,
- zloženie teplonosnej tekutiny doplnené o odlišnú nemrznúcu zmes [29].

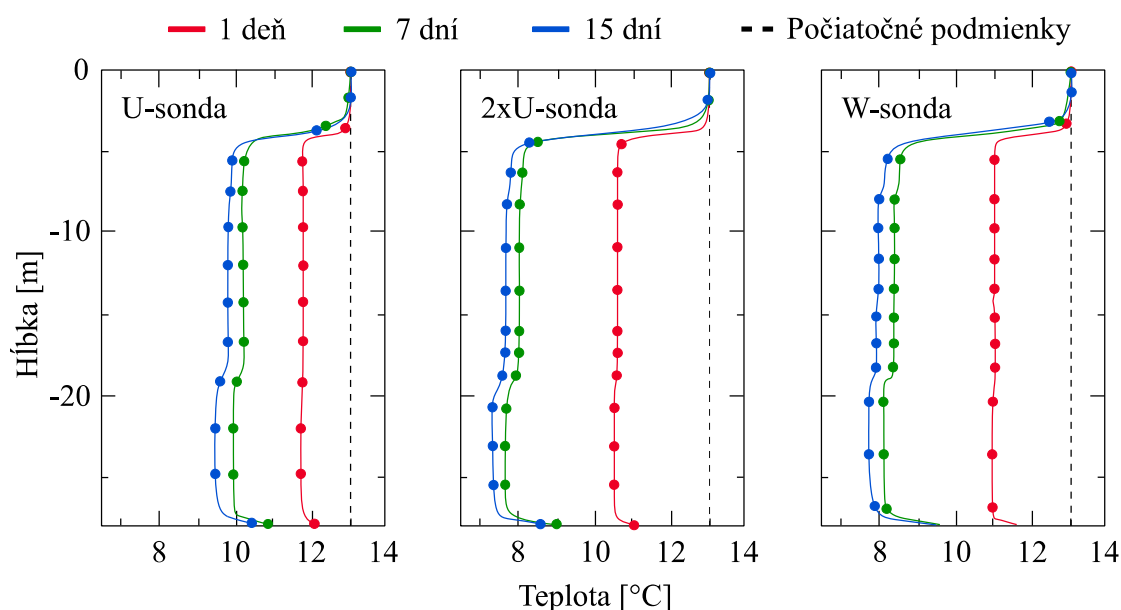
Podkladom tejto štúdie bol experiment z Lausanne podľa [1], ktorý je podrobne opísaný v časti 5.2.2.

V prípade simulácie bol pomocou softvéru COMSOL Multiphysics (využívajúceho metódu konečných prvkov) vytvorený 3D model, v ktorom bolo zamedzené vertikálnym aj horizontálnym posunom v dolnej časti modelu a zároveň horizontálnym posunom v okrajových častiach modelu. Tok tepla bol umožnený zo spodnej ako aj z bočných častí. Jednotlivé parametre úlohy sú zobrazené v tabuľke 4.2, uvedená teplota reprezentuje počiatočnú teplotu v pilóte a zároveň v podloží. Simulácia prebiehala v zimnom období, kedy nastáva prenos tepla z podložia smerom k pilóte. Teplonosná tekutina cirkulovala v HDPE potrubíach a jej teplota bola 5 °C [29].

Tabuľka 4.2: Parametre simulovanej úlohy podľa [29].

Výška pilóty	Priemer pilóty	Počiatočná teplota	Teplonosná tekutina	Trvanie testu
28 m	0,90 m	13,2 °C	voda	15 dní

V prvej časti boli porovnané výsledky pre rôzne usporiadania potrubí: U-sonda, dvojité U-sonda, W-sonda, na ktorých boli pozorované zmeny teploty, hodnoty napätia a posunutia. V prípade závislosti teploty na hĺbke (pozri obrázok 4.1) nebolo možné badať zmeny od hlavy pilóty do hĺbky 4,0 m, keďže potrubia boli do tejto úrovne izolované, pravdepodobne kvôli vplyvu klimatických zmien vo vrchných častiach podložia. Počas 15 dní dochádzalo k ochladeniu pilóty podľa tabuľky 4.3 [29].



Obrázok 4.1: Rozloženie osovej teploty pilóty pre rôzne konfigurácie potrubí [29].

Tabuľka 4.3: Zmeny teploty pilóty po 15 dňoch pre rôzne usporiadanie potrubí [29].

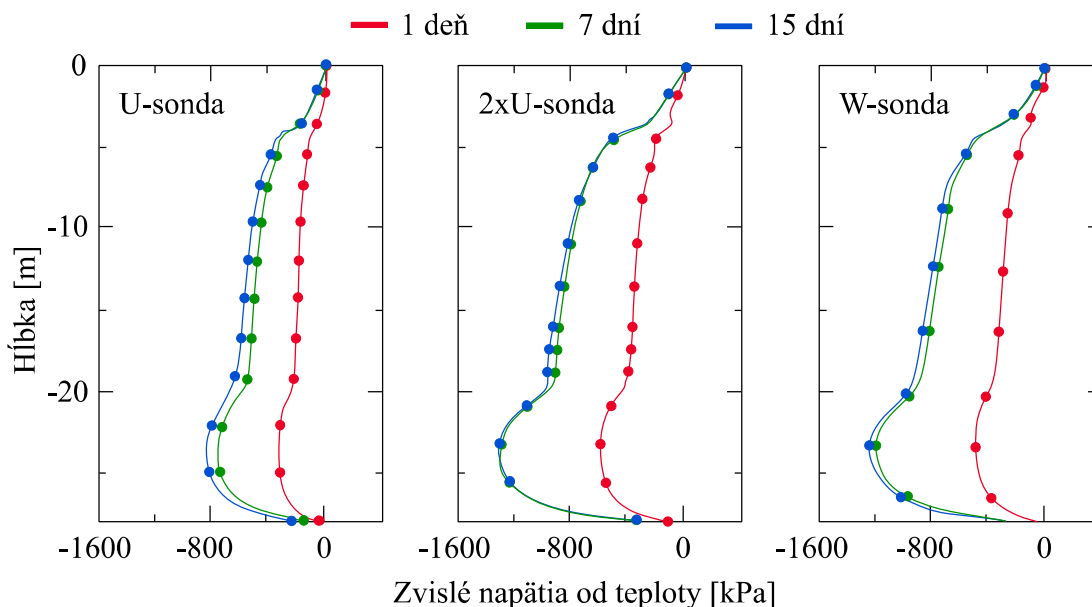
Typ	U-sonda	Dvojitá U-sonda	W-sonda
Zmena teploty $\Delta T$ [°C]	-3,5	-5,5	-5,0

Najväčšia zmena teploty bola zaznamenaná pre dvojitú U-sondu, pretože v nej naraz prúdilo najväčšie množstvo studenej vody. Tabuľka 4.4 udáva hodnoty maximálnych napätí vyvolaných teplotou po výške pilóty pre jednotlivé typy potrubí, ktoré sú graficky znázornené na obrázku 4.2 [29].

Tabuľka 4.4: Hodnoty maximálnych napätí od teploty [29].

Typ	U-sonda	Dvojitá U-sonda	W-sonda
Maximálne napätie [kPa]	-800	-1400	-1300

Hodnoty získané z numerickej simulácie sú konzistentné s hodnotami experimentu v časti 5.2.2. Usporiadanie potrubí, ktoré viedlo k najväčším záporným zmenám teploty vo vnútri pilóty (dvojitá U-sonda), zároveň viedlo k najväčším hodnotám napätí [29]. Rozsah napätia vyvolaný zmenou teploty v U-sonde bol podobný meraniu podľa Gashti a kolektív [36], ktorí taktiež testovali energopilótu vystrojenú rovnakým typom potrubia v zimnom období.

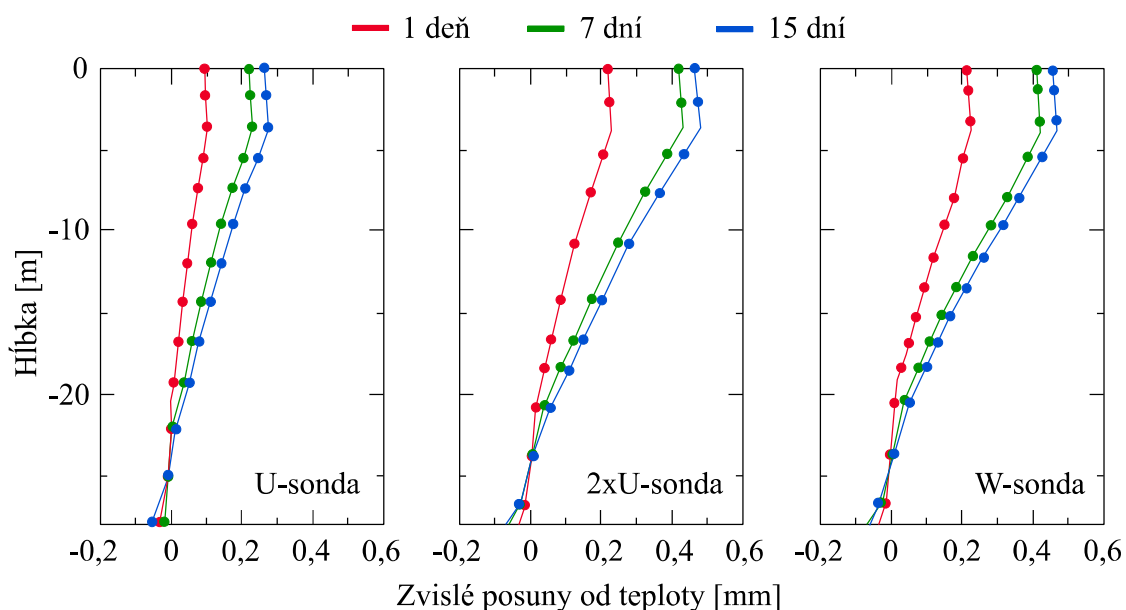


Obrázok 4.2: Osové rozloženie zvislých napätí od teploty pre rôzne konfigurácie potrubí [29].

Najväčší vplyv na posunutia, pri ochladzovaní, bol odpozorovaný pre dvojitú U-sondu, konkrétne hodnoty sadnutia sú zobrazené v tabuľke 4.5. Nulový bod sa nachádzal v spodnej časti pilóty pre všetky prípady (pozri obrázok 4.3), podobne ako pozorovali autori Gashti a kolektív [36].

Tabuľka 4.5: Hodnoty sadnutia pre rôzne uloženie potrubí v pilóte [29].

Typ	Dvojitá U-sonda	W-sonda	U-sonda
Maximálne sadnutie [mm]	0,47	0,46	0,28



Obrázok 4.3: Osové rozloženie zvislých posunutí od teploty pre rôzne konfigurácie potrubí [29].

Nasledujúcim uvažovaným kritériom bol pomer rozmerov základovej konštrukcie, označovaný aj ako AR (aspect ratio), ktorý je možné určiť podľa rovnice 4.1.

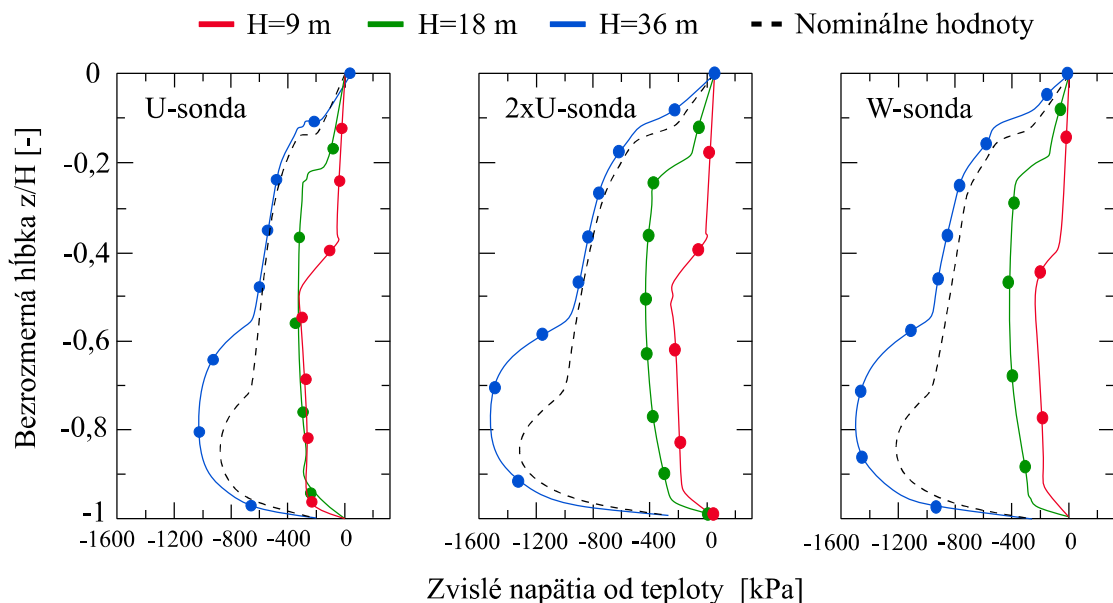
$$AR = \frac{\text{výška pilóty [m]}}{\text{priemer pilóty [m]}} \quad (4.1)$$

V tejto štúdií sa nemenil priemer pilóty, bola uvažovaná konštantná hodnota 0,90 m, výška konštrukcie a s ňou spojená hodnota AR sa menili podľa tabuľky 4.6. Nárast výšky pilóty vyústil v lineárny nárast výmeny tepla, nezávisle na type usporiadania potrubia [29].

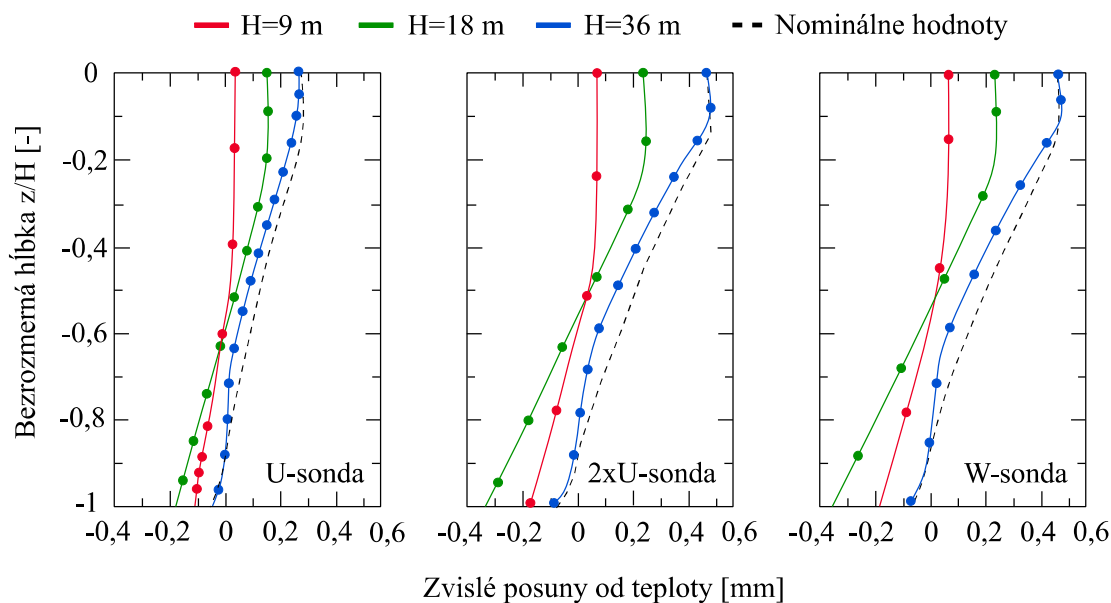
Tabuľka 4.6: Uvažované rozmery pilóty [29].

Výška konštrukcie [m]	9	18	28	36
AR [-]	10	20	31,1	40

Podľa obrázku 4.4 je možné určiť, že nižšie a jednotnejšie hodnoty napätí boli pozorované pre nižšie hodnoty AR – 10 a 20, naopak pre vyššie hodnoty AR (31,1 a 40) boli hodnoty napätí skôr nehomogénne. Príčinou mohli byť hneď dva aspekty: 1) rôzne správanie z hľadiska únosnosti pilóty, 2) rôzne teplotné vlastnosti jednotlivých vrstiev podlažia. Pri štúdiu posunutí (pozri obrázok 4.5) bol tzv. nulový bod približne v geometrickom strede základu pre hodnoty AR – 10 a 20. Čím boli hodnoty AR väčšie, tým sa posúval nulový bod smerom k päte pilóty. Predĺženie alebo skrátenie pilóty teda môže výrazne ovplyvniť odozvu konštrukcie na termo-mechanické namáhanie [29].



Obrázok 4.4: Osové rozloženie zvislých napätí od teploty pre rôzne hodnoty AR [29].



Obrázok 4.5: Osové rozloženie posunutí od teploty pre rôzne hodnoty AR [29].

V ďalších častiach tejto simulácie boli skúmané zmeny teploty tekutiny prúdiacej potrubím a množstvo získanej geotermálnej energie. Z pozorovaní bolo možné zaznamenať lineárny nárast teploty vody v smere prúdenia a najväčší nárast teploty bol sledovaný pre W-sondu, obdobné výsledky je možné pozorovať aj v prípade Gao a kolektív [16]. Počas všetkých testov bol odsledovaný pokles získanej geotermálnej energie po výške pilóty, čo zároveň odpovedá poklesu teploty s hĺbkou na plášti pilóty. Najviac geotermálnej energie bolo získanej v prípade dvojitej U-sondy a W-sondy. Po 15 dňoch vykazovala dvojité U-sonda až o 57 % vyššiu rýchlosť toku tepla než jednoduchá U-sonda. Vo všetkých prípadoch prebehol úbytok získanej geotermálnej energie počas prvých 5 dní. V tomto

čase, nastal pokles rýchlosti toku tepla o 30 % oproti prvému dňu pre jednoduchú U-sondu a až o 45 % pre pilótu vystrojenú dvojitou U-sondou a W-sondou [29].

Autori sa zamerali aj na vyšetrenie termo-mechanického správania energopilóty charakterizovaného odlišným prietokom tekutiny v potrubiach. Prietok závisí na priemere použitého potrubia a rýchlosti prúdenia tekutiny, preto boli pozorované dva prípady: 1) pre rôzne priemery potrubia bola aplikovaná konštantná rýchlosť prúdenia tekutiny (pozri tabuľku 4.7) a 2) pre potrubia s rovnakým priemerom zas odlišná rýchlosť prúdenia (pozri tabuľku 4.8) [29].

Tabuľka 4.7: Variácie vyšetrovaných primerov potrubí pre konštantnú rýchlosť 0,2 m/s [29].

	Zmenšený priemer	Nominálna hodnota	Zväčšený priemer
Priemer potrubia [mm]	25	32	40

U W-sondy došlo so zväčšením priemeru k nárastu vertikálneho osového napätia o -200 kPa oproti nominálnym podmienkam, no u ostatných typov uloženia potrubia nastali iba minimálne zmeny. Najmarkantnejší efekt bolo možné pozorovať pre rôzne priemery potrubí vo W-sonde, kde sa zvýšila schopnosť transportu tepla o 10 % pri zväčšení priemeru z 25 mm na 40 mm [29].

Tabuľka 4.8: Variácie rýchlosti prúdenia teplotonosnej tekutiny pre nominálny priemer potrubia 32 mm [29].

	Nominálna hodnota	Zväčšená rýchlosť 1	Zväčšená rýchlosť 2
Rýchlosť prúdenia [m/s]	0,2	0,5	1,0

Pre prípady rôznej rýchlosti prúdiacej tekutiny v jednoduchej U-sonde a dvojitej U-sonde neboli pozorované žiadne výrazné zmeny zvislých napätí. V prípade W-sondy, vyššie rýchlosti prúdenia spôsobili nárast osového vertikálneho napätia o -200 kPa. Nárast rýchlosti prúdenia tekutiny spôsobil pokles teploty odtekajúcej tekutiny – kvôli nárastu prietoku. Zmena rýchlosti prúdenia dokázala vyvolať zmeny v účinnosti prenose tepla. Opäť boli najväčšie zmeny zaznamenané pre W-sondu (ale len s malými rozdielmi). Zmena rýchlosti z 0,2 na 0,5 m/s zvýšila efektívnosť o 7 %, v prípade zmeny z 0,2 na 1 m/s to bolo asi o 11 %. Zmena v efektívnosti prenosu tepla bola spôsobená eliminovaním časového oneskorenia prenosu tepla. V rozložení zvislých napätí v pilóte neboli pozorované výrazné zmeny v závislosti na zmene prietoku [29].

V poslednej časti boli použité 3 rôzne typy teplotonosnej tekutiny: voda, MEG25 (25 %-ná zmes monoetylén glykolu a vody) a MEG50 (50 %-ná zmes). V tomto prípade neboli očakávané výrazné zmeny mechanického správania konštrukcie (hodnoty sadnutia či napätia) – čo bolo potvrdené. Použitie nemrznúcich zmesí neovplyvnilo teplotu tekutiny ale spôsobilo pokles hmotnostnej tepelnej kapacity použitého média. Pre menšie koncentrácie nemrznúcej zmesi (MEG25) bol pokles rýchlosti toku tepla asi o 6 %. Až

---

väčšie hodnoty koncentrácií (MEG50) zapríčinili výraznejší pokles, a to o 11 % oproti podmienkam, kedy v potrubí cirkulovala čistá voda. Avšak, vyššie koncentrácie nemrznúcej zmesi nemajú pre prax využitie [29].

V konečnom dôsledku je možné zvoliť usporiadanie potrubí a pomer AR ako najdôležitejšie faktory pri termo-mechanickom správaní energopilóty v rámci tejto štúdie. Výrazným faktorom bol aj prietok tekutiny v potrubíach, ten ale ovplyvnil iba energetickú stránku konštrukcie, zatiaľ čo uloženie potrubí a AR aj stránku geotechnickú. Usporiadanie potrubí do W-sondy spôsobilo nárast v rýchlosti toku tepla až o 54 % oproti klasickej U-sonde pri rovnakom prietoku. Aj keď uloženie potrubí do dvojitej U-sondy vykazovalo až dvakrát väčší prietok vzhľadom na iné usporiadania, taktiež spôsobovalo ochladenie materiálu pilóty v spojení s vývinom najväčších napätí a posunutí. Preto je nepopierateľne lepším uložením, z geotechnického aj energetického hľadiska, možnosť s W-sondou [29].



## 5 Metódy skúmania a publikované štúdie

Správanie energetických pilót môže byť vyšetrované nasledovne:

- Analyticky,
- Experimentálne (laboratórne merania, in situ testy),
- Numericky.

### 5.1 Analytické metódy

Pri týchto metódach dochádza k rozloženiu konkrétneho problému na čiastkové a nasleduje riešenie jednotlivých problémov. Prvé vytvorené modely popisovali deje prebiehajúce vo vrtoch, ktoré slúžili ako výmenníky tepla.

Pri energetických pilótach nastáva jav, kedy teplo preniká z potrubia do materiálu pilóty, najčastejšie betónu, a následne do okolitého podlažia. Z tohto dôvodu je najväčšou problematikou vedenie tepla, a to nielen v pilóte ale aj v podlaží [27]. V tabuľke 5.1 je uvedený prehľad niektorých analytických modelov v oblasti tepelnej kondukcie.

Tabuľka 5.1: Prehľad analytických modelov pre vedenie tepla.

Autor(i)	Rok	Podstata modelu	Zdroj
Jaeger	1944	Okamžitý priamkový zdroj v kompozitnom médiu	[37]
Ingersoll a kolektív	1954	Transport tepla cez nekonečný priamkový zdroj (Infinite line source)	[38]
Carslaw & Jaeger	1959	Transport tepla cez nekonečný dutý valec (Infinite hollow cylinder source)	[39]
Eskilson	1987	Vedenie tepla v zeminách obklopujúcich konečný priamkový zdroj tepla pri konštantnom tepelnom toku pre ustálený stav (Finite line heat source); Vývin G-funkcií	[40]
Zeng a kolektív	2002	Vedenie tepla v zeminách obklopujúcich konečný priamkový zdroj tepla pri konštantnom tepelnom toku pre prechodný stav (Finite line heat source)	[41]
Man a kolektív	2010	Vedenie tepla pre 1D a 2D nekonečný/konečný tuhý valcový zdroj pomocou Greenovej funkcie (Infinite/Finite solid cylinder)	[42]
Li & Lai	2012	Spojité priamkové zdroje v kompozitnom médiu	[43]
Li & Lai	2012	Model špirálového zdroja tepla	[44]
Ghasemi-Fare & Basu	2013	Prstencový valcový zdroj tepla	[30]

Boli predstavené aj ďalšie návrhy modelov, napríklad od Lamarche & Beauchamp (2007) [45], Bandos a kolektív (2009) [46], alebo Bozis a kolektív (2011) [47] či Akrouch a kolektív (2016) [48], ktoré vychádzajú prevažne z poznatkov existujúcich modelov uvedených v tabuľke 5.1.

Keďže majú pilóty väčší priemer a menšiu hĺbku ako vrty, trvá dlhšiu dobu než je v pilóte dosiahnutý ustálený stav, zároveň má pilóta v porovnaní s okolitým prostredím odlišné tepelné charakteristiky. Väčšina týchto modelov má isté obmedzenia najmä z časového hľadiska ich platnosti, keďže väčšinu z nich je možné aplikovať až v momente, keď systém dosiahne svoj ustálený stav [27].

Modely bývajú spravidla reprezentované rovnicami, ktoré je nutné vyriešiť metódou numerických integrácií v programoch ako Matlab či Maple, preto môžu byť takéto modely často nazývané aj semi-analytické [27].

## 5.2 Experimentálne metódy

Pomocou experimentálnych metód je možné sledovať správanie pilót, ktoré sa čo najviac približuje ich skutočnému správaniu. Jedná sa o laboratórne merania, kde je skutočná pilóta aproximovaná určitým vhodným spôsobom alebo in situ testy skutočných rozmerov pilóty na reálnom stavenisku či skúšobnom mieste. Tieto merania bývajú prevádzané ako krátkodobé aj dlhodobé a je pri nich možné sledovať rôzne veličiny. Jednotlivé hodnoty veličín je možné zaznamenať rôznymi druhmi senzorov, ktoré je nutné vhodne rozmiestniť pozdĺž konštrukcie.

### 5.2.1 Laboratórne merania

Príkladom laboratórneho merania je úloha od skupiny autorov z parížskej univerzity (A. Kalantidou, A. M. Tang, J.-M. Pereira, G. Hassen), cieľom ktorej bolo vytvorenie predbežnej štúdie energetickej pilóty. Tá bola namáhaná rôznymi hodnotami mechanického zaťaženia a navyše bola vystavená cyklickému tepelnému namáhaniu (pozri tabuľka 5.2). Monitorované boli hodnoty teploty pilóty a posuny v jej hlave [49].

Tabuľka 5.2: Charakteristiky vykonaných testov podľa [49].

Označenie testu	Mechanické zaťaženie [N]	Počet tepelných cyklov	Proces ohrevu → vývin dodatočných napätí v päte pilóty:
Test 1	0	2	Nespôsobilosť sadnutie päty pilóty
Test 2	200	2	
Test 3	400	2	Spôsobilosť sadnutie a vývin nevratného pretvorenia
Test 4	500	2	

Skúšobná pilóta bola nahradená uzavretou hliníkovou trubicou o ďalších rozmeroch podľa tabuľky 5.3 a bola uložená v ocelevej nádobe valcového tvaru s priemerom 570 mm. Teplonosnou tekutinou v potrubí bola voda a tento experiment bol vykonaný v pieskoch

Fontainebleau, ktoré sú príznačné tým, že neobsahujú žiadne ílovité častice. Každý test pozostával z nasledujúcich krokov:

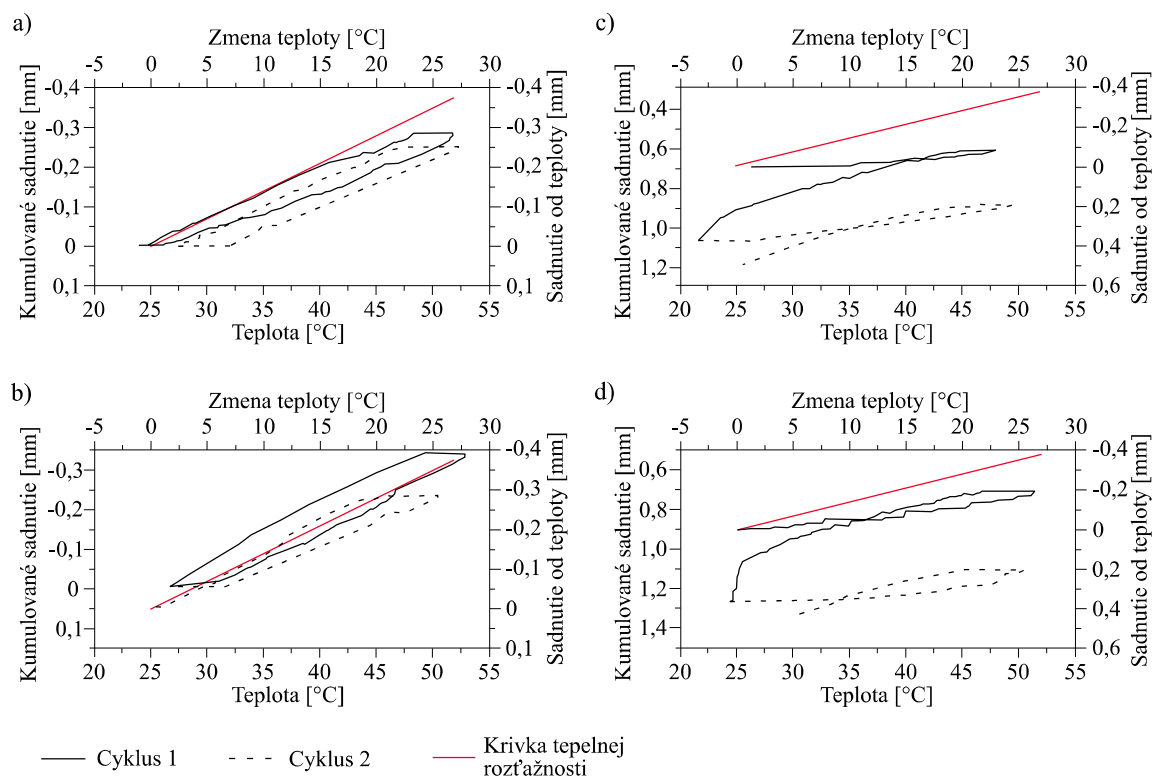
1. Zhutnenie zeminy.
2. Nastavenie fyzikálneho modelu.
3. Aplikácia mechanického zaťaženia.
4. Namáhanie tepelnými cyklami, pričom jeden tepelný cyklus pozostával z ohrevu z 25 °C na 50 °C a následného ochladenia na 25 °C [49].

Tabuľka 5.3: Špecifikácia skúšobnej pilóty podľa [49].

Vonkajší priemer	Vnútorný priemer	Dĺžka	Potrubie
20 mm	18 mm	800 mm	U-sonda Dĺžka – 0,8 m $\varnothing_{\text{ext}}$ 3 mm ( $\varnothing_{\text{int}}$ 2 mm)

Po vnesení menších hodnôt mechanického zaťaženia vyvolal ohrev pilóty nadvihnutie hlavy pilóty a ochladzovanie zasa jej pokles. Pre zaťaženia do 200 N boli hodnoty posunov v hlave pilóty pomerne malé – menej než 0,2 mm, avšak Test 3 vykazoval posuny v hlave pilóty 0,4 mm už po prvom tepelnom cykle. Celkový posun po dvoch tepelných cykloch bol 0,5 mm. Osová dilatácia pilóty počas procesu ohrievania obrátila smer mobilizovaného plášťového trenia. Proces ohrevu spôsobil vývin dodatočných napätí a ten ďalšie procesy uvedené v tabuľke 5.2. Na začiatku každej fázy ochladzovania (pozri obrázok 5.1) je možné pozorovať stabilnú hodnotu v grafickej závislosti teploty na posunutí, kde posunutie nie je mobilizované napriek tomu, že už započalo ochladzovanie. Tento jav môže byť vysvetlený difúziou tepla z pilóty do okolitého prostredia alebo heterogénnou teplotou pozdĺž pilóty [49].

Výpočtom bola stanovená hodnota celkovej únosnosti pre tento fyzikálny experiment na 525 N. Termo-elastické správanie vykazoval prvok v prípadoch, kedy mechanické zaťaženie tvorilo asi 40 % z celkovej únosnosti (Test 1 a Test 2), naopak, ak bola hodnota zaťaženia viac ako 40 % celkovej únosnosti (Test 3 a Test 4), v prvku nastal vývin nevratných sadnutí. Pre testy kde sa mechanické zaťaženie približovalo konečnej únosnosti (525 N) boli tieto efekty navyše spojené s creep-ovým správaním zeminy [49].



Obrázok 5.1: Výsledky fyzikálneho modelu pre zaťaženia: a) 0 N; b) 200 N; c) 400 N; d) 500 N [49].

### 5.2.2 In situ experimenty

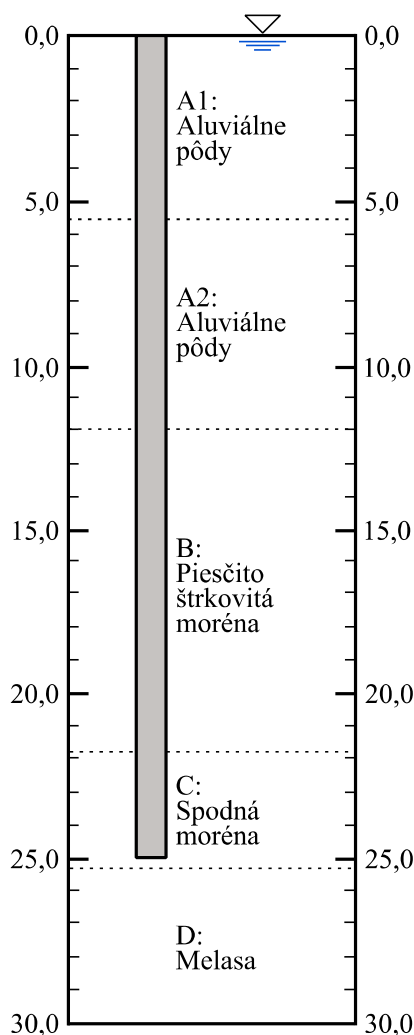
I keď je štúdium reálnych konštrukcií pomerne finančne aj technicky náročné, existujú štúdie z rôznych krajín, ktoré riešia rozličné konfigurácie experimentov.

Prvým príkladom je štúdia od autorov (L. Laloui, M. Nuth, L. Vulliet), ktorá mala slúžiť ako príspevok k optimalizácii návrhu pre energetické pilóty, determinácii návrhových parametrov a k popisu výpočtovej metódy týchto systémov [1].

Kolektív autorov sa zameriaval na správanie rôzne zaťaženej pilóty, ohrievanej aj ochladzovanej, formou in situ testov, tie boli následne podporené numerickou simuláciou. Cieľom bolo zistiť či aplikovanie teploty vyvolá nárast namáhania pôsobiaceho na pilótu. Testy prebiehali počas výstavby 5-podlažnej budovy vo švajčiarskom meste Lausanne, o rozmeroch  $100 \times 30$  m, ktorá mala byť podporovaná až 97 pilótami dĺžky 25 m. Zahnuté bolo aj pôsobenie hladiny podzemnej vody nachádzajúcej sa v blízkosti povrchu terénu a geológie podľa obrázka 5.2. Parametre testovanej pilóty z experimentálnych meraní popisuje tabuľka 5.4 [1].

Tabuľka 5.4: Charakteristika testovanej pilóty podľa [1].

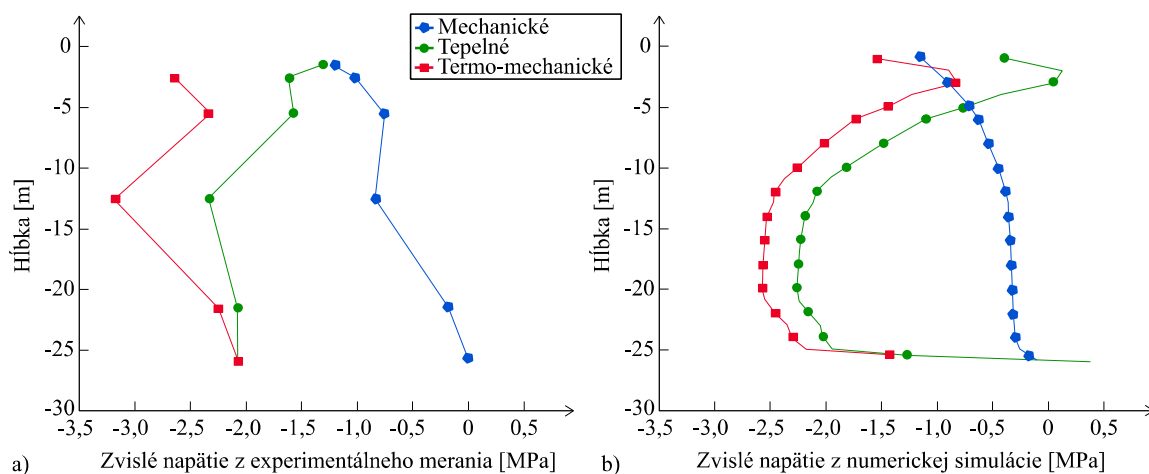
Priemer pilóty	Dĺžka pilóty	Materiál pilóty	Potrubie	Teplonosné médium	Merané veličiny
0,88 m	25,8 m	betón 32 GPa	PE U-sonda	voda	zaťaženie pretvorenie teplota



Obrázok 5.2: Prierez geologickými vrstvami podlažia pre [1].

Aplikované boli rôzne hodnoty mechanického zaťaženia spôsobené výstavbou budovy, maximálne však 1300 kN. Tepelné zaťaženie bolo aplikované samostatne aj striedavo, aby bolo docielené oddelenie efektu pri mechanickom a tepelnom namáhaní. Namáhanie teplotou bolo aplikované vždy po výstavbe konkrétneho podlažia budovy pomocou zariadenia regulujúceho teplotu vody v potrubíach. Celkovo prebehlo 9 testov (T0-T8), v ktorých bola aplikovaná zmena teploty 15 °C s výnimkou testu T1, kde bola zmena teploty až 21 °C. Test T0 predstavoval betonáž pilóty, T1 demonštroval stav voľnej hlavy pilóty, pretože neprebehla výstavba prvého podlažia a záverečný test T8 ilustroval prirodzenú teplotu zeminy. V teste T1 prebiehal cyklus ohrievania 12 dní a cyklus ochladzovania 16 dní, nebolo aplikované žiadne mechanické zaťaženie a pilóta nebola obmedzená v hlave, došlo k vývinu pretvorení v pilóte spôsobených tepelným namáhaním. Vzniknuté pretvorenia neboli jednotné počas ohrievania a boli ovplyvnené trením na plášti pilóty. S narastajúcou teplotou pilóta dilatovala. Testy T5 a T6 naznačovali, že nárast teploty o 1 °C spôsobí vývin dodatočnej zvislej sily o hodnote okolo 100 kN, celková osová sila sa zvýšila až na dvojnásobok sily vyvolanej samostatným mechanickým zaťažením [1].

Obrázok 5.3 poukazuje na rozdiely v správaní pilóty pri mechanickom, tepelnom a termo-mechanickom namáhaní, zároveň porovnáva údaje o zvislých napätiach získaných z in situ testov a numerickej simulácie. Podľa obrázka 5.3a bolo zvislé mechanické napätie veľké v hlave pilóty a zmenšovalo sa s hĺbkou tak, že päta pilóty neprenášala skoro žiadne zaťaženie, zatiaľ čo namáhanie od teploty bolo väčšie a skôr rovnomerné. Údaje z experimentu zobrazujú preťaženie v hlave pilóty a solicitáciu päty pilóty. Obrázok 5.3b poukazuje na skutočnosť, že model bol schopný reprodukovat' pokles zvislých napätí od mechanického namáhania s hĺbkou ako aj nárast zvislých napätí od teploty [1].



Obrázok 5.3: Porovnanie zvislých napätí z experimentu v Lausanne s numericou simuláciou [1].

V oblasti správania podložia, táto štúdia ukázala, že po pôsobení teploty (ohrievaní) došlo k zdurení povrchu terénu. Vyvolané zvislé pretvorenia boli dilatáčného charakteru, no experiment ukázal aj vývin tlakových pretvorení v päte pilóty. V podloží bol viac viditeľný vplyv pôsobenia teploty oproti pôsobeniu mechanického namáhania. Podľa pohybov pilóty bolo možné dedukovať, že odpor na plášti nebol zasiahnutý pôsobením teploty a pri ohrievaní dokonca došlo k uvoľneniu bočného mobilizovaného trenia na plášti [1].

V inej štúdií, kolektív autorov (R. M. Singh, A. Bouazza, B. Wang) uvádza štúdium odozvy pilóty počas tepelných testov – ohrievania. In situ experiment prebiehal v Austrálii, na reálnej pilóte v hustých pieskoch s obsahom kremeňa resp. piesčitých ílov, kde v okolí skúšobného miesta nebola zaznamenaná prítomnosť hladiny podzemnej vody. Jednalo sa o špirálou vŕtanú, na mieste betónovanú pilótu s charakteristikami podľa tabuľky 5.5. Vo vnútri pilóty bolo osadené potrubie z HDPE, ktoré je tiež špecifikované v tabuľke 5.5, teplotnou tekutinou v potrubí bola voda. V pilóte boli osadené aj dve Osterbergove bunky (O-bunky), ktoré sa používajú pri zaťažovacích testoch. Okrem pilóty boli prevedené ďalšie dva vrty (podľa tabuľky 5.5) vo vzdialenostiach 0,8 m a 2,3 m od stredu pilóty, tie slúžili na sledovanie teplotnej odozvy pilóty i podložia [50].

Tabuľka 5.5: Charakteristiky prevedených skúšobných konštrukcií podľa [50].

Druh	Priemer [m]	Hĺbka [m]	Materiál	Vystuženie		Potrúbie
Pilóta	0,6	16,1	betón	pozdĺžne priečne	6 ks. Ø 20 Ø 10/250 mm	3 × U-sonda; Ø 25; dl. 14,2 m
Vrt 1	0,1	18,6	cementová		-	-
Vrt 2	0,1	16,1	kaša		-	-

Proces ochladzovania prebiehal voľne bez akéhokoľvek riadeného procesu, došlo jednoducho k prerušeniu pumpovania teplotnosnej tekutiny do potrubí pilóty. Cieľom ročného merania bolo získať poznatok o tom, do akých vzdialeností od pilóty siahajú dôsledky ohrievania a za aký zotavovací čas sa podmienky v podloží vrátia do počiatočných hodnôt. Uskutočnené testy sú bližšie špecifikované v tabuľke 5.6 [50].

Tabuľka 5.6: Typy vykonaných testov a ich časové rozloženie podľa [50].

Označenie testu	Názov testu	Počet slučiek	Dĺžka potrubia [m]	Trvanie testu	Čas na zotavenie
1	1-Loop ST	1	28,4	3 dni	5 dní
2	3-Loop ST	3	85,2	9 dní	47 dní
3	3-Loop LT	3	85,2	52 dní	92 dní

Z tabuľky 5.6 je vidieť, že prebehli dva testy v kratšom časovom intervale (ST - short time) a jeden v dlhšom časovom úseku (LT - long time). V teste 1 došlo k nerovnomernému nárastu teploty v pilóte pravdepodobne kvôli aktivácií len jednej slučky. Keďže bol test pomerne krátky z časového hľadiska, bolo náročné zaznamenať nejakú odozvu vo vzdialenejšom vrte 2. Najvyšší nárast teploty v podloží bol zaznamenaný v hĺbke 12 m počas všetkých testov, čo bolo pravdepodobne spôsobené vrstvou veľmi hustého piesku s vysokým obsahom kremeňa, ktorý je charakterizovaný dobrými tepelne-vodivostnými vlastnosťami. Čím viac tepla zemina absorbovala, tým sa znižovala jej schopnosť prijať ďalšie teplo. Počas testov došlo k časovému oneskoreniu postupu tepla, a to s narastajúcou vzdialenosťou od zdroja. Na zotavenie pilóty aj zeminy bol nakoniec nutný dvakrát dlhší časový interval oproti času potrebnému k ohrevu. Experiment demonštroval pohyb tepla v radiálnom smere, avšak pri teste 3 šlo naviac aj o transport v smere vertikálnom. Rýchlosť toku tepla takejto pilóty neovplyvnila narastajúca teplota, tá závisí priamo na rozdieli teploty tekutiny a prietoku [50].

Ďalším príkladom je zaťažovací test energetickej pilóty uloženej v londýnskych íloch od autorov - P. J. Bourne-Webb, B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson, P. Payne [26]. Pri tomto in situ testovaní bolo vyšetrované aplikované zaťaženie na pilótu, posuny v hlave pilóty, zaznamenávaná bola aj okolitá teplota a vstupná/výstupná teplota tekutiny prúdiacej v potrubíach. Hodnoty boli odčítané pre nasledujúce prípady: počiatočný zaťažovací test, koniec prvého cyklu ochladzovania a koniec prvého cyklu ohrievania. Až

následným odvodením z testových údajov boli získané hodnoty sily mobilizovanej v pilóte a odpor na plášti pilóty. Cieľom bolo zistenie vplyvu cyklického tepelného namáhania na energopilótu charakterizovanú v tabuľke 5.7. Vo vzdialenosti 0,5 m od pilóty bol umiestnený vrt na sledovanie odozvy prvku.

Tabuľka 5.7: Parametre testovanej pilóty podľa [26].

	Priemer	Dĺžka	Vystuženie	Potrubie	Mech. zaťaženie
Pilóta	600 mm	23 m	6 ks. Ø 32 mm	PE Ø 32 mm	1200 kN

Monitorované teploty podložia sa pohybovali v rozmedzí 18 – 20 °C, čo bolo viac ako predpokladaných 12 °C až 15 °C. Údaje z testov ukazujú, že veľmi malý odpor bol mobilizovaný v hornej časti pilóty, najväčšia časť v strednom segmente pilóty a znova malá časť v päte pilóty – toto ale len potvrdzuje správanie dlhej, štíhlej pilóty pod pracovným zaťažením v londýnskych íloch. Ochladzovanie pilóty viedlo k vývinu ťahových napätí v spodných častiach drieku pilóty, no pri projektoch, kde by boli tepelné cykly menšieho rozsahu, nemusí dochádzať k vývinu ťahu. Podľa experimentu bolo zistené, že ak je pilóta namáhaná ohrievaním, vzniká v nej dodatočné napätie od teploty, zároveň zamedzenie koncových častí prvku má vplyv na túto skutočnosť. V závere bolo potvrdené termo-elastické správanie pilóty – zmeny v odozve pilóty na tepelné namáhanie rezultovali v zmršťovaní resp. roztáhovaní pilóty [26].

### 5.3 Numerické metódy

Ak je pilóta namáhaná termo-mechanickým zaťažením, kombinácia zaťaženia v hlave pilóty, plášťového trenia a odporu v päte spôsobí v pilóte vývin dodatočného napätia od teploty. Práve numerické metódy sú schopné predikovať tieto vlastnosti komplexnejšou formou. Medzi dve najčastejšie používané metódy patria: metóda prenosových funkcií (Load-transfer method) a metóda konečných prvkov (Finite element method) [27].

#### 5.3.1 Metóda prenosových funkcií (Load-transfer method)

Táto metóda bola prvýkrát popísaná v roku 1966 podľa Harry M. Coyle a Lymon C. Reese a je pravdepodobne jednou z najpoužívanějších metód slúžiacich na opis správania vzájomného vzťahu medzi podložíom a konštrukciou pilóty [27].

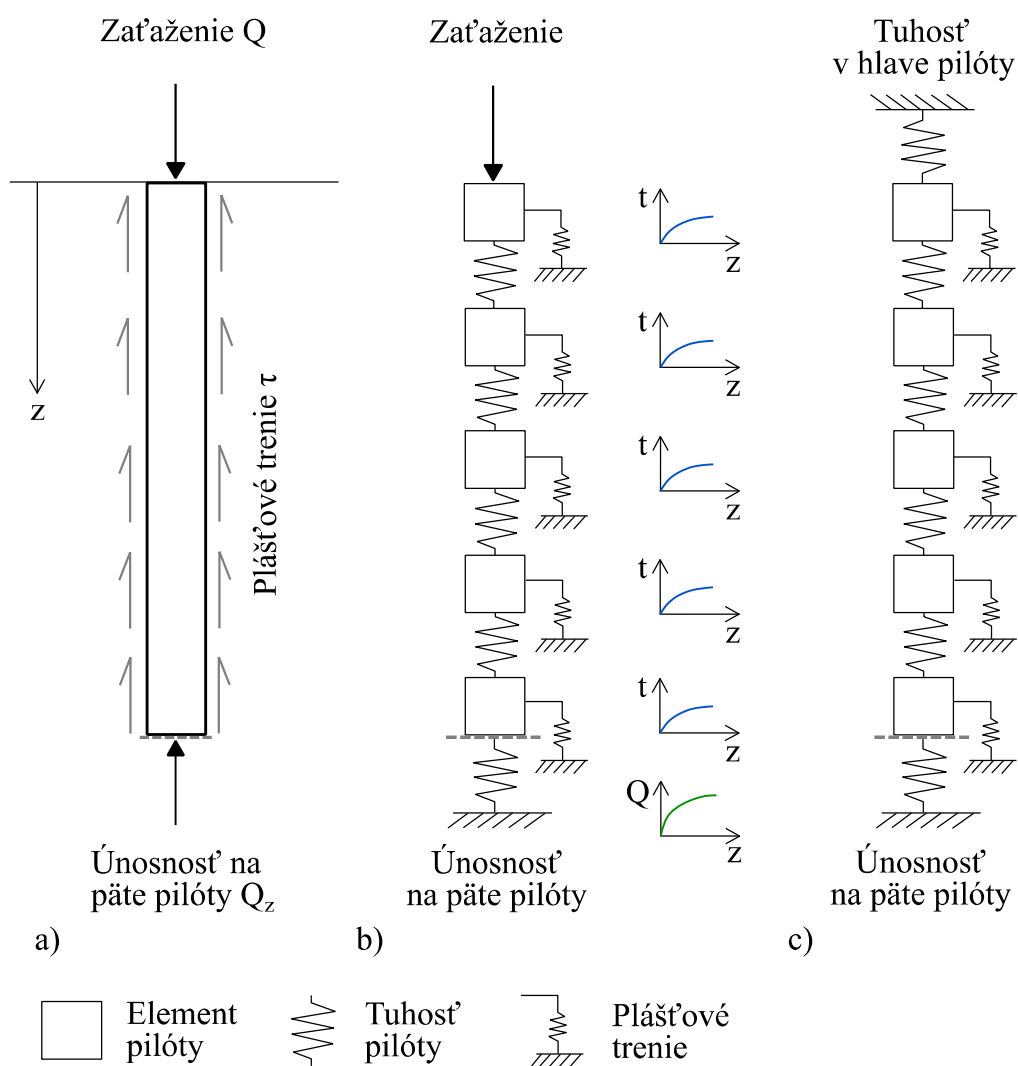
Pilóta je modelovaná ako skupina elementárnych prvkov (pozri obrázok 5.4b) podporovaných diskretnými nelineárnymi pružinami reprezentujúcimi odpor zeminy vo forme plášťového trenia a ďalšou nelineárnou pružinou umiestnenou v päte posledného elementu, ktorá predstavuje ukotvenie pilóty v zemine. Pružiny medzi prvkami predstavujú osovú tuhosť pilóty [27].

V tejto iteračnej metóde ide o stanovenie priebehu normálového napätia v drieku pilóty najčastejšie pomocou tenzometrických meraní, princíp sa inak nazýva aj t-z metódou. To vychádza z využívania t-z kriviek pri popise pružín, ktoré sa určovali



empiricky, bolo ich možné získať len z konkrétnych meraní, čo tvorí zároveň nevýhodu tejto metódy [51].

Osová sila je funkciou hĺbky a meniaceho sa externého zaťaženia. Pre každý posun je možné stanoviť prenosovú funkciu, pričom je hodnota sadania určená z pracovného diagramu pilóty. Prenosové funkcie sú tvorené sústavou kriviek, pomocou ktorých je možné spočítať plášťové trenie dané pomerom smernice dotýčnice ku krivke danej prenosovej funkcie a obvodom pilóty [24]. Nelineárne pevnostné krivky na obrázku 5.4, označované ako  $t$ - $z$  krivky, indikujú trenie na plášti a  $Q$ - $z$  krivky predstavujú odpor v päte pilóty [52].



Obrázok 5.4: Metóda prenosových funkcií: a) model zaťaženia pilóty, b) spôsob modelovania pilóty namáhanej mechanickým zaťažením, c) spôsob modelovania energetickej pilóty (namáhanej mechanickým aj tepelným zaťažením) [27].

V prípade energetickej pilóty (pozri obrázok 5.4c) je možné použiť modifikovanú verziu prenosových funkcií, ktorá sa používa na približnú predikciu vzťahu sadania pilóty pri osovom zaťažení. V týchto modeloch je uvažovaná tepelná rozťažnosť resp. zmršťiteľnosť pilóty. Rozdiel tvorí ďalšia pružina pridaná do miesta hlavy pilóty, ktorá

predstavuje akúsi okrajovú podmienku, a to vo vzťahu k hornej stavbe. Proces tepelného spevnenia a/alebo zmäkčenia zeminy môže byť tiež zahrnutý do štúdia cyklických degradačných efektov pôsobiacich na plášťové trenie pilóty [27].

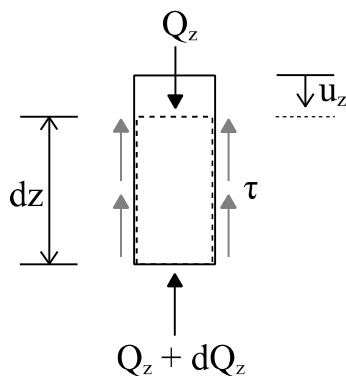
Následne je uvedený matematický popis metódy. Zo silovej rovnováhy, pre element pilóty podľa obrázku 5.5, je možné získať rovnicu 5.1 [52]:

$$Q_z = Q_z + dQ_z + \tau \cdot C \cdot dz \quad (5.1)$$

a následnou úpravou rovnicu 5.2:

$$-\frac{dQ_z}{dz} = \tau \cdot C \quad (5.2)$$

kde je  $Q_z$  sila v hĺbke  $z$ ,  $\tau$  značí plášťové trenie v hĺbke  $z$  a  $C$  je obvod pilóty opäť v hĺbke  $z$  [52].



Obrázok 5.5: Element pilóty [52].

Pre osovo zaťažené prúty popisuje rovnica 5.3 vývin vnútorných síl v pilóte pri osovom zaťažení elementu pilóty:

$$Q_z = -EA \frac{du_z}{dz} \quad (5.3)$$

kde  $E$  je modul pružnosti elementu,  $A$  je prierezová plocha elementu pilóty a  $u_z$  je posunutie prvku vzhľadom na zaťaženie elementu v hĺbke  $z$  [52]. Po derivácii rovnice 5.3 a následnom dosadení do rovnice 5.2 vzniká:

$$EA \frac{d^2 u_z}{dz^2} = \tau \cdot C \quad (5.4)$$

ďalej finálnou úpravou rovnica 5.5 [52]:

$$-EA \frac{d^2 u_z}{dz^2} + \tau \cdot C = 0 \quad (5.5)$$

Nevýhodou tejto metódy je, že funkcie sú kalibrované predovšetkým pre zaťaženie pilóty. Proces zaťažovania nemá elastický charakter, keďže posuny v hlave pilóty vyvolané zaťažovaním sa nikdy nevrátia do svojich pôvodných hodnôt po odťažení [53].

---

### 5.3.2 Metóda konečných prvkov (Finite element method)

Metóda konečných prvkov (MKP) sa využíva v rôznych odvetviach techniky už od roku 1960 a je možné ju aplikovať na rôzne typy úloh: pružné deformácie, prúdenie tepla, prúdenie tekutín, dynamika či iné. MKP slúži skôr ako nástroj využívaný pri skúmaní systémov než ich návrhový nástroj.

Metóda využíva polynomiálnu interpoláciu po častiach, kedy je skúmaná oblasť rozčlenená na menšie podoblasti – konečné prvky, každý element pozostáva z určitého počtu uzlov. Uzly spájajú jednotlivé prvky a každý uzol má istý konečný počet stupňov voľnosti. Dôležitým prvkom je definovanie okrajových podmienok modelu. Konečný prvok môže byť 1D (prútový), 2D (doskový) či 3D (objemový). Výsledkom MKP je sústava algebrických rovníc, ktoré však nie je možné vyriešiť ručným výpočtom [54].

Susedné prvky zdieľajú spoločné uzly v mieste spojenia, no nesmú sa vzájomne prekrývať. Neznáme veličiny sú dané funkčnými hodnotami v uzloch, preto je primárne nutné získať algebrické rovnice pre každý prvok podľa nasledujúcej rovnice:

$$[K^E]\{u^E\} = \{F^E\} \quad (5.6)$$

kde  $\{u^E\}$  predstavuje vektor uzlových posunutí,  $[K^E]$  je matica tuhosti elementu a  $\{F^E\}$  je vektor pravej strany resp. vektor uzlových síl [54].

Základnou podstatou tejto metódy je to, že každá veličina vyskytujúca sa v základných rovniciach predstavuje určitú všeobecnú špecifikáciu. Matica  $[K]$  predstavuje vlastnosť, vektor  $\{u\}$  zasa správanie a vektor  $\{F\}$  reprezentuje pôsobenie resp. činnosť. Konkrétny význam sa líši v závislosti na odbore, ktorý MKP vyšetruje. V prípade teplotnej analýzy je vlastnosť reprezentovaná tepelnou vodivosťou, správanie teplotou a činnosť predstavuje zdroj tepla. Pre globálny problém je tak definovaná rovnica:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (5.7)$$

v ktorej  $\{u\}$  reprezentuje globálny vektor uzlových teplôt telesa,  $[K]$  je globálna matica tepelnej vodivosti telesa a  $\{F\}$  je globálny vektor pravej strany (zdroja tepelného toku). Vyriešenie rovnice 5.6 spočíva v metóde inverzných matíc kedy:

$$\{u\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (5.8)$$

udáva vyriešenie neznámych posunutí (resp. teplôt).  $[K]^{-1}$  predstavuje inverznú globálnu maticu tuhosti (resp. tepelnej vodivosti) [54].

U energetických pilót slúži metóda konečných prvkov na predikciu termomechanického správania. Pri modelovaní nastávajú 3 základné kroky:

1. Počiatočná geostatická rovnováha,
2. Aplikácia zaťaženia v hlave pilóty od hornej stavby,
3. Aplikovanie tepelného namáhania [27].

Nevýhodami tejto metódy môže byť požiadavka na správne zadanie vstupných údajov výpočtu ale aj náležitá interpretácia získaných výsledkov.

Ďalšou súčasťou analýzy je vedenie tepla v prostredí, preto je uvedený stručný popis vedenia tepla v pórovitom médiu. Hustota tepelného toku v nesaturovanom pórovitom prostredí pozostáva z:

$$[q_T] = -\lambda \nabla T + nS\rho_w c_w [V_w]T \quad (5.9)$$

v ktorej je  $\lambda$  koeficient tepelnej vodivosti,  $\nabla T$  teplotný gradient,  $n$  predstavuje efektívnu pórovitosť,  $S$  je hodnota saturácie,  $\rho_w$  hustota vody,  $c_w$  je hmotnostná tepelná kapacita kvapaliny,  $T$  predstavuje teplotu a výraz pre fázovú rýchlosť vody  $[V_w]$  je možné napísať ako:

$$[V_w] = \left[ \frac{k_{rel}}{\mu} \kappa^{int} (\nabla p_w + \rho_w \{g\}) \right] \quad (5.10)$$

kde  $k_{rel}$  je relatívna permeabilita prostredia,  $\mu$  predstavuje viskozitu kvapaliny,  $\kappa^{int}$  je tenzor permeability,  $\nabla p_w$  gradient tlaku vody a  $\{g\}$  je vektor gravitačného zrýchlenia. Základná rovnica pre transport tepla v pórovitom prostredí je daná:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla [q_T] = Q_T \quad (5.11)$$

v nej  $\partial T/\partial t$  predstavuje parciálne derivácie teploty podľa času,  $\nabla [q_T]$  reprezentuje divergenciu hustoty tepelného toku a  $Q_T$  je externý/interný zdroj energie. Tepelnú kapacitu pórovitého prostredia ( $c\rho$ ) je možné definovať nasledujúcou rovnicou:

$$c\rho = nSc_w\rho_w + n(1-S)c_g\rho_g + (1-n)c_s\rho_s \quad (5.12)$$

v ktorej  $c_w$ ,  $c_g$ ,  $c_s$  sú hmotnostné tepelné kapacity kvapalného (w), plynného (g) a pevného skupenstva (s) [55]. Odvođením a dosadením (podrobne v [56]) je možné určiť hlavnú rovnicu pre vedenie tepla, ktorú využíva aj program Plaxis 2D ako:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) & \left[ \frac{k_{rel}}{\mu} \kappa^{int} (\nabla p_w + \rho_w \{g\}) \right] \cdot \nabla T \\ & + \rho_w c_w T \left\{ \nabla \cdot \left[ \frac{k_{rel}}{\mu} \kappa^{int} (\nabla p_w + \rho_w \{g\}) \right] \right\} - Q_T \\ & - C_{as}(T - T_a) = 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

kde  $C_{as}$  je koeficient konvekcie tepla a  $T_a$  je teplota okolitého vzduchu [56].

Táto analýza predstavuje časť THM (termo-hydro-mechanickej) analýzy, pomocou ktorej je možné popísať združené deje prebiehajúce v takýchto úlohách.

### 5.3.3 Dostupné štúdie

Prvým príkladom je numerické modelovanie autorov (N. Wu & Y. Gan), ktorí previedli simuláciu energetickej pilóty pre rôzne hodnoty mechanického zaťaženia pod cyklickým tepelným namáhaním. Cieľom bolo sledovanie sadnutia pilóty vyvolaného tepelným namáhaním [57].

V tomto prípade bola zemina plne saturovaná ( $\gamma_{\text{sat}}=18,53 \text{ kN/m}^3$ ) a teplota pilóty sa pohybovala v rozmedzí  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  od okolitej teploty, ktorá bola  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Každý tepelný cyklus trval 24 hodín a pozostával zo zahriatia – ochladenia – zotavenia. Nasledujúca tabuľka 5.8 zobrazuje parametre modelovaných prvkov [57].

Tabuľka 5.8: Informácie o modelovaných prvkoch podľa [57].

	Pilóta	Okolité prostredie
Druh náhrady/prostredia	Hliníková trubica	Kaolinický íl
Konštitučný model	Lineárne-elastický	Cam-clay
Rozmery prvku	Priemer – 20 mm	Šírka – 290 mm
	Dĺžka – 600 mm	Hĺbka – 900 mm
Tepelná expanzia [ $1/^\circ\text{C}$ ]	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-6}$
Tepelná vodivosť [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	237	1,5

Cam-clay konštitučný model použitý pre zeminu využíva pravidlo pórovej elasticity a dokáže efektívnejšie simulovať zahusťovací proces počas tepelných zaťažovacích testov. Simulácia bola prevedená pomocou programu ABAQUS, ktorý pracuje na princípe metódy konečných prvkov. Vytvorený bol 2D osovo symetrický model, kde sa zároveň uvažovalo s dostatočne veľkou tepelnou vodivosťou, aby bolo zamedzené vývinu tepelného odporu na rozhraní podložie-pilóta [57]. V tabuľke 5.9 sú uvedené detaily jednotlivých simulácií ako aj hodnoty aplikovaných zaťažení či získané výsledky.

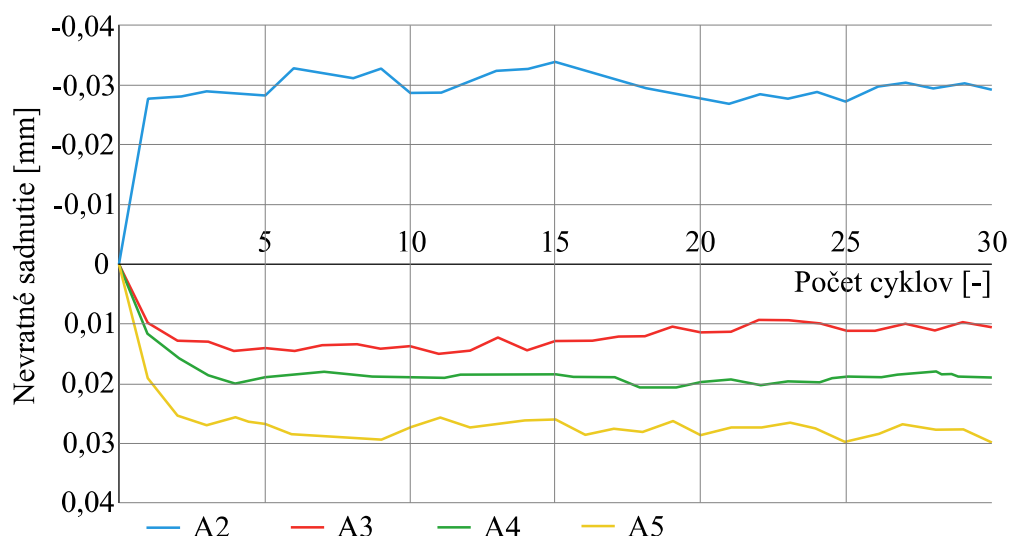
Tabuľka 5.9: Parametre numerickej simulácie a výsledky podľa [57].

Označenie testu	Mechanické zaťaženie [N]	Tepelné namáhanie	Reakcia modelu na namáhanie	Ustálené hodnoty sadnutia dosiahnuté
A1*	550	-	-	-
A2	0	30 cyklov	Nadvihnutie pilóty namiesto sadnutia	Po 1. cykle
A3	100	30 cyklov	Vyššie hodnoty	
A4	200	30 cyklov	sadnutia – vývin	Počas 3 cyklov
A5	300	30 cyklov	nevratného sadnutia	

\*test na určenie predpokladanej celkovej únosnosti konštrukcie

Zaujímavou skutočnosťou je, že nevratné sadnutie po odťažení bolo menšie ako hodnoty sadnutia od tepelného namáhania v každom teste. Pre testy A3, A4 a A5 bol najväčší prírastok nevratného sadnutia zaznamenaný hneď po prvom tepelnom cykle (pozri

obrázok 5.6). Štúdia ukázala, že dôsledky tepelného namáhania závisia na množstve mechanického zaťaženia, ktoré je aplikované – sadnutie pilóty narastá s narastajúcim mechanickým zaťažením [57].



Obrázok 5.6: Nevratné hodnoty sadnutia v závislosti na počte tepelných cyklov [57].

Ďalšia štúdia od autorov (R. M. S. Maiorano, G. Marone, G. Russo, L. Di Girolamo) sa zaoberá spätnou analýzou experimentálneho merania. Sústreďuje sa na sadnutie konštrukcie vyvolané zaťažením a prenosové krivky pilóty namáhanej mechanickým, ale aj tepelným zaťažením (ohrievaním/ochladzovaním). Autori vychádzajú z londýnskeho experimentu prevedeného v Lambeth College [26], kde šlo o zaťažovanie pilóty uloženej v londýnskych íloch [58]. Priebeh experimentálneho merania bol bližšie popísaný v časti 5.2.2.

Pri spätnej analýze bol použitý program Plaxis 2D a základné parametre modelu popisuje tabuľka 5.10. Boli použité dva typy konštitučných modelov: lineárne elastický (LE) a lineárne elastický-perfektne plastický s Mohr-Coulombovou podmienkou porušenia (MC), výsledky ktorých boli následne porovnané s výsledkami z in situ testov [58].

Tabuľka 5.10: Prehľad použitých charakteristík pri numerickej simulácii podľa [58].

Výška modelu	Šírka modelu	Dĺžka pilóty	Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti betónovej pilóty $\alpha$	Počiatočná teplota (uvažovaná v celom modeli)
35 m	15 m	23 m	$8,5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$	19,5 °C

Pri počiatočnom zaťažovaní oba modely nadhodnocovali posunutie v hlave pilóty, pri ďalšom zaťažovaní MC model predikoval správanie adekvátnejšie, zatiaľ čo LE model stále tieto hodnoty navyšoval. Počas fázy ochladzovania MC model navýšil hodnoty posunutia pilóty, no naopak model LE opisoval lepšiu zhodu s meranými experimentálnymi hodnotami. Pri ohreve systému oba modely nadhodnocovali hodnoty posunutia pilóty.

V závislosti osovej sily na hĺbke vykazujú oba modely uspokojivé výsledky, ktoré sa približujú hodnotám z in situ testu [58]. Bolo teda ukázané, že aj prostredníctvom jednoduchých modelov je možné simulovať uspokojivú odozvu energopilóty.

V nasledujúcom prípade previedla skupina autorov (N. Yavari, A. M. Tang, J.-M. Pereira, G. Hassen) numerickú simuláciu pre vykonané experimentálne merania. Na numerické modelovanie bol opäť použitý program Plaxis 2D, úlohy boli modelované ako osovo súmerné v dimenziách odpovedajúcich experimentom. Východiskom pre numerické modelovanie boli dva in situ testy a jeden fyzikálny model (pozri tabuľku 5.11), v ktorých šlo o termo-mechanické namáhanie energopilóty a o štúdium jej správania.

Tabuľka 5.11: Parametre pre numerickú simuláciu uvedených experimentov.

	Laloui a kol. (2003) [1]	Bourne-Webb a kol. (2009) [26]	Kalantidou a kol. (2012) [49]
Označenie Typ experimentu	A in situ	B in situ	C fyzikálny model
Parametre modelovanej pilóty			
Priemer [m]	1,0	0,550	0,020
Dĺžka [m]	25,8	23,0	0,6
Modul pružnosti E [GPa]	29,2	40,0	13,0
Poissonovo číslo $\nu$ [-]	0,20	0,20	0,33
Koeficient teplotnej roztlačnosti $\alpha$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	30,0	25,5	66,0
Typ podložia	Obrázok 5.2	Londýnske íly	Piesky Fountainbleau
Testy	T0-T8	-	T1-T4
Mechanické zaťaženie	zamedzenie posunov v hlave pilóty stavbou	osová sila v hlave pilóty	osová sila v hlave pilóty
Tepelný proces	ohrev o 15 °C → samovoľné ochladenie	20 °C → médium: od -2,5 °C do 36 °C	25 °C → 50 °C → 25 °C
Monitorované hodnoty	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Osové pretvorenie</li> <li>▪ Posuny v hlave pilóty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Teplota</li> <li>▪ Pretvorenie</li> <li>▪ Posuny v hlave pilóty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Teplota pilóty</li> <li>▪ Posuny v hlave pilóty</li> </ul>

Pri tvorbe modelu bol použitý zjednodušený princíp a síce, tepelné namáhanie bolo vnesené aplikáciou objemových pretvorení pilóty. V tomto prípade bolo uvažované len

---

tepelné pôsobenie v pilóte a tepelné pôsobenie v zemine nebolo uvažované. Objemové pretvorenie je možné spočítať z koeficientu teplotnej rozťažnosti resp. zmršťiteľnosti materiálu a zmeny teploty  $\Delta T$  ako bolo uvedené v rovnici 3.1 (pozri kapitolu 3). Pilóta bola modelovaná ako izotropný lineárne elastický neporézny materiál, okolité podložie ako izotropný lineárne elastický materiál s Mohr-Coulombovou podmienkou porušenia. Nebol použitý žiaden kontaktný prvok a pre experiment B boli použité niektoré špecifikácie podľa [28].

Pre experiment A sa hodnoty pretvorení získané z in situ testov a modelovania relatívne zhodujú, až na skutočnosť, že v simulácií sa správanie počas fázy zotavovania zdá skôr opačného charakteru. Výchylky, ku ktorým došlo môžu byť spôsobené variabilitou vo vlastnostiach podložia meniacich sa s hĺbkou [59].

Pri experimente B sú hodnoty numerického modelovania vyhovujúce pre fázy, kedy dochádzalo k mechanickému zaťažovaniu a k procesu ochladzovania, v prípade ohrievania došlo k nadhodnoteniu posunov v hlave pilóty [59].

Experiment C udáva, že posuny v hlave pilóty korešpondujú s tepelnou rozťažnosťou pilóty, čo bolo potvrdené. Najväčšie nezrovnalosti je možné badať pre test T2 (200 N), čo môže byť spôsobené 1 g modelom, v ktorom sú úrovne napätia relatívne nízke. Uspokojivá zhoda bola preukázaná pre väčšie hodnoty zaťaženia [59].

Vo všeobecnosti môžu mať rôzne dôvody dopad na popísané rozdiely medzi prevedenými experimentálnymi meraniami a numerickými simuláciami: neprítomnosť kontaktného prvku, predpoklad homogénnej teploty pilóty či neuvažovanie tepelného pretvorenia v zemine. V praxi sa totiž ukázalo, že pri difúzií tepla z pilóty do pôdy sú hodnoty teplôt jednotnejšie [59].



## 5.4 Chronologický prehľad vybraných štúdií

Nasledujúca tabuľka 5.12 udáva základné parametre vybraných štúdií prevedených pre rôzne prípady skúmania energopilót.

Tabuľka 5.12: Chronologický prehľad vybraných štúdií pre energopilóty.

Rok	Autor(i)	Miesto	Typ štúdia			Podstata	Ref.
			In situ	Lab. test	Numericky		
2006	L. Laloui M. Nuth L. Vulliet	Švajčiarsko	✓		✓	Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[1]
2009	P. J. Bourne-Webb B. Amaty K. Soga T. Amis C. Davidson P. Payne	Veľká Británia	✓			Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[26]
2012	A. Kalantidou A. M. Tang J.-M. Pereira G. Hassen	Francúzsko		✓		Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[49]
2014	G. A. Akrouh M. Sánchez J.-L. Briaud	USA	✓			Termo-mechanické namáhanie.	[33]
2014	N. Yavari A. M. Tang J.-M. Pereira G. Hassen	Francúzsko		✓		Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[60]
2014	N. Yavari A. M. Tang J.-M. Pereira G. Hassen	Francúzsko			✓	Termo-mechanické namáhanie.	[59]
2015	R. M. Singh A. Bouazza B. Wang	Austrália	✓			Tepelné namáhanie.	[50]
2015	R. M. Singh A. Bouazza B. Wang C. H. Haberfield S. Baycan Y. Carden	Austrália	✓			Tepelné namáhanie.	[61]

Rok	Autor(i)	Miesto	Typ štúdia			Podstata	Ref.
			In situ	Lab. test	Numericky		
2015	S. Park CH. Sung K. Jung B. Sohn A. Chauchois H. Choi	Kórea	✓			TRT testovanie.	[35]
2015	N. Batini A. F. Rotta Loria P. Conti D. Testi W. Grassi L. Laloui	Švajčiarsko Taliansko			✓	Termo-mechanická odozva pilóty pre rozličné parametre.	[29]
2016	N. Yavari A. M. Tang J.-M. Pereira G. Hassen	Francúzsko		✓		Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[62]
2017	K. A. Gawecka D. M. G. Taborda D. M. Potts W. Cui L. Zdravković M. S. Haji Kasri	Veľká Británia			✓	Termo-mechanické namáhanie.	[63]
2018	Z. Lv G. Kong H. Liu L. Laloui	Čína	✓			TRT testovanie.	[64]
2018	H. Peng G. Kong H. Liu H. Abuel-Naga Y. Hao	Čína		✓		Termo-mechanické namáhanie.	[65]
2019	R. M. S. Maiorano G. Marone G. Russo L. Di Girolamo	Taliansko			✓	Cyklické termo-mechanické namáhanie.	[58]

---

## 6 Numerická simulácia

Jednoduchá numerická simulácia správania energetickej pilóty bola prevedená v komerčnom programe Plaxis 2D (ver. 2018). Vymodelovaná energetická pilóta bola uložená v podloží z piesku a bola zaťažaná v hlave pilóty osovou silou (mechanickým zaťažením) o rôznych hodnotách. Zahrnuté bolo aj pôsobenie teploty (tepelné namáhanie), a to prostredníctvom pretvorení vnesených do pilóty. Celkovo boli prevedené tri simulácie pre nasledujúce prípady:

- 1) Rôzne hodnoty tepelného zaťaženia (ohrievanie) pre pilótu namáhanú rôznymi hodnotami mechanického zaťaženia bez akýchkoľvek obmedzení v hlave či v päte pilóty.
- 2) Rôzne hodnoty tepelného zaťaženia (ohrievanie) pre pilótu, u ktorej bolo aplikované zamedzenie vertikálnych posunov v hlave pilóty.
- 3) Jednoduchá simulácia cyklického termo-mechanického namáhania, bez obmedzení v hlave či v päte pilóty.

### 6.1 Matematický model

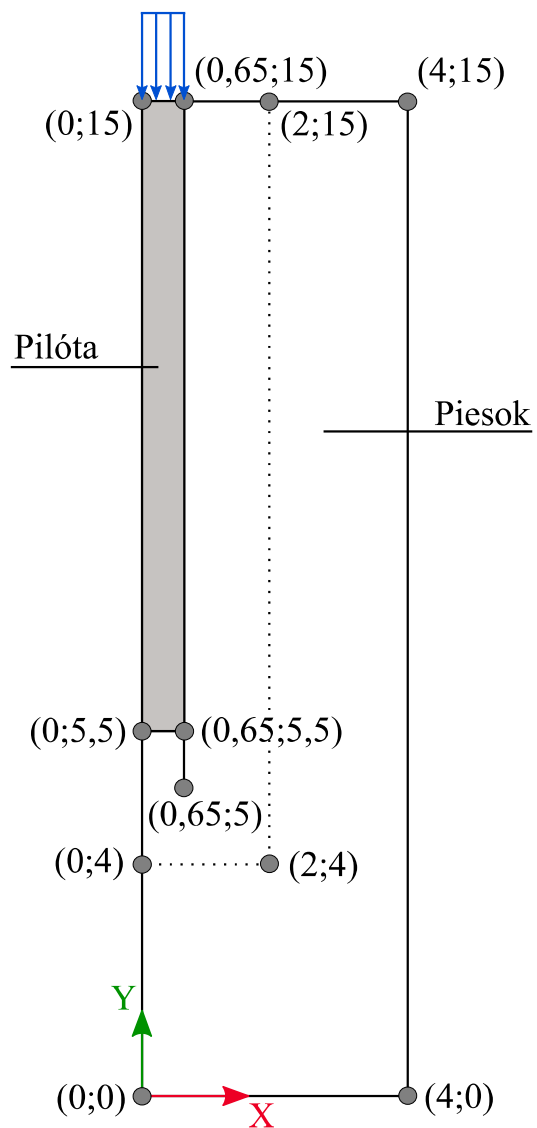
Program Plaxis 2D využíva na analýzu metódu konečných prvkov, ktorá bola predstavená v časti 5.3.2. Model bol vytvorený v dvojrozmernom priestore s využitím 15-uzlového konečného prvku. Úloha bola modelovaná ako osovo symetrická, z tohto dôvodu postačovalo vytvoriť iba polovicu modelovaného prostredia.

#### 6.1.1 Parametre matematického modelu

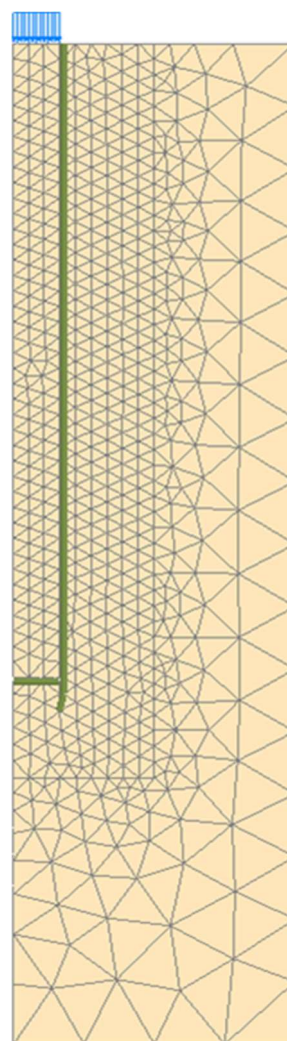
Model je 4,0 m široký a 15,0 m vysoký. Modelovaná pilóta má polomer 0,65 m (priemer pilóty je teda 1,3 m) a dĺžku 9,5 m, uvažované bolo konkrétne usporiadanie modelu podľa obrázku 6.1. Hladina podzemnej vody nebola v tejto simulácii uvažovaná. Dôkladná parametrická štúdia vstupných hodnôt modelu v tomto prípade nebola prevedená.

Okolitému prostrediu bol priradený materiál s názvom – Piesok, betónovej pilóte bol priradený materiál s názvom – Pilóta. Rozhranie na plášti pilóty s podložíom bolo doplnené o kontaktný prvok, ktorý bol predĺžený v päte pilóty (pozri obrázok 6.1). Vymodelované bolo aj zaťaženie, pri aplikácii ktorého bolo potrebné uvažovať prierezovú plochu pilóty, na ktorú toto zaťaženie pôsobilo. Tabuľka 6.1 udáva použité konštitučné modely a všetky nutné charakteristiky materiálov využitých pri tvorbe modelovanej úlohy. Údaje tabuľky sú uvedené v anglickom jazyku kvôli lepšej orientácii v programe Plaxis 2D.

Sieť konečných prvkov bola generovaná so stredným rozložením prvkov, avšak v miestach pilóty a v oblasti okolia pilóty bola táto sieť zjemnená s výsledným faktorom hrubosti 0,25. Oblasť zjemnenia siete je ohraničená súradnicami: (0;4), (2;4) a (2;15). Takto vymodelovaná úloha pozostávala z 1170 konečných prvkov a 9722 uzlov, vygenerovaná sieť konečných prvkov je zobrazená na obrázku 6.2.



Obrázok 6.1: Schéma uvažovaného modelu energopilóty.



Obrázok 6.2: Generovaná sieť konečných prvkov z programu Plaxis 2D.

Tabuľka 6.1: Materiálové charakteristiky modelovaného podložia a pilóty.

Parameter	Symbol	Piesok	Pilóta	Unit
General				
Material model	Model	HS model	Linear elastic	-
Type of behaviour	Type	Undrained (A)	Non-porous	-
Unit weight above phreatic line	$\gamma_{\text{unsat}}$	17	24	kN/m <sup>3</sup>
Unit weight below phreatic line	$\gamma_{\text{sat}}$	20	-	kN/m <sup>3</sup>
Parameters				
Young's modulus (constant)	E	-	$30 \times 10^6$	kN/m <sup>2</sup>
Secan stiffness in standard drained triaxial test	$E_{50}^{\text{ref}}$	$50 \times 10^3$	-	kN/m <sup>2</sup>
Tangent stiffness for primary oedometer loading	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$50 \times 10^3$	-	kN/m <sup>2</sup>
Unloading/reloading stiffness	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$150 \times 10^3$	-	kN/m <sup>2</sup>
Power for stress-level dependency of stiffness	m	0,5	-	-
Poisson's ratio	$\nu'_{\text{ur}}$	0,20	0,15	-
Cohesion	$c'_{\text{ref}}$	0	-	kN/m <sup>2</sup>
Friction angle	$\phi'$	31	-	°
Dilatancy parameter	$\psi$	0	-	°
Interface				
Interface strength type	Type	Manual	Rigid	-
Interface strength	$R_{\text{inter}}$	0,8	1,0	-
Initial				
$K_0$ determination	-	Automatic	Automatic	-
Lateral earth pressure coefficient	$K_{0,x}$	0,4850	0,5000	-

### 6.1.2 Výpočtové fázy

Pri riešení jednotlivých čiastkových úloh bolo nutné nadefinovať špecifickú postupnosť výpočtových krokov, ktorá ovplyvňuje numerickú simuláciu. Zobrazené fázy výpočtu odpovedajú úrovňovému rozvetveniu v programe Plaxis 2D.

V prvej časti bolo zobrazené štúdium správania energetickej pilóty, ktorá bola zaťažaná mechanicky a zároveň tepelne. Najprv bolo uvažované mechanické zaťaženie hodnôt 250 kN, 500 kN a 1000 kN. Zmena teploty  $\Delta T$  narastala od 10 °C do 40 °C. Konkrétne fázy výpočtu:

- Počiatočná fáza
- Inštalácia pilóty
  - Mechanické zaťaženie 250 kN a  $\Delta T=0$  °C
    - 250 kN a  $\Delta T=10$  °C
    - 250 kN a  $\Delta T=20$  °C
    - 250 kN a  $\Delta T=30$  °C

- 250 kN a  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Mechanické zaťaženie 500 kN a  $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 
  - 500 kN a  $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 500 kN a  $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 500 kN a  $\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 500 kN a  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Mechanické zaťaženie 1000 kN a  $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 
  - 1000 kN a  $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 1000 kN a  $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 1000 kN a  $\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 1000 kN a  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

V časti 2 došlo k zamedzeniu vertikálneho posunu v hlave pilóty. Následne bolo aplikované tepelné namáhanie pre jednotlivé zmeny teploty  $\Delta T$  od  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fázy výpočtu pre tento prípad:

- Počiatočná fáza
- Inštalácia pilóty
  - Fixácia hlavy pilóty
    - $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - $\Delta T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

V poslednej časti bola prevedená simulácia cyklického termo-mechanického namáhania energopilóty. V tomto prípade bolo uvažované mechanické zaťaženie 500 kN vyvozené v hlave pilóty. Tepelné namáhanie započalo procesom ohrievania z  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nasledovalo ochladenie z  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a konečne ohrev z  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jednotlivé fázy výpočtu pre časť 3:

- Počiatočná fáza
- Inštalácia pilóty
- Mechanické zaťaženie 500 kN
  - 500 kN a  $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 500 kN a  $\Delta T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 500 kN a  $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 6.2 Metodika výpočtu

Štúdium správania energopilóty bolo prevedené pre tri rôzne prípady popísané v úvode simulácie. V každej časti boli použité rovnaké materiálové charakteristiky, rozmery modelu aj celkové rozloženie prvkov. Tepelné namáhanie bolo vnesené zjednodušenou formou, pomocou pretvorenia pilóty  $\varepsilon$  v jednom smere, a to v smere vertikálnom -  $\varepsilon_{yy}$ . Výpočet prebiehal na základe rovnice 3.1, pričom bola použitá hodnota koeficientu tepelnej rozťažnosti/zmršťovania  $\alpha_c$  pre materiál pilóty – betón.

Jednotlivé hodnoty pretvorenia pre časť 1 sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 6.2.

Tabuľka 6.2: Výpočet pretvorenia pre časť 1 a zároveň časť 2.

$\Delta T$ [°C]	0	10	20	30	40
$\alpha_c$ [m/(m.°C)]	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$\varepsilon$ [-]	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004
$\varepsilon$ [%]	0	0,01	0,02	0,03	0,04

V druhej časti došlo k zamedzeniu zvislých posunov v hlave pilóty. Tento prípad sa najviac približuje reálnej situácii, kedy je hlava pilóty fixovaná hornou stavbou. Vnášanie teploty bolo prevedené obdobne, podľa tabuľky 6.2.

V časti 3 došlo k simulácii cyklického namáhania energopilóty, kde bolo tepelné namáhanie vnesené rovnakým princípom, ale podľa hodnôt z tabuľky 6.3.

Tabuľka 6.3: Výpočet pretvorenia pre časť 3.

Postup:	Počiatkový stav	0 °C → 20 °C	20 °C → -20 °C	-20 °C → 0 °C
$\Delta T$ [°C]	0	20	-40	20
$\alpha_c$ [m/(m.°C)]	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
$\varepsilon$ [-]	0	0,0002	-0,0004	0,0002
$\varepsilon$ [%]	0	0,02	-0,04	0,02

### 6.3 Získané výsledky

V tejto časti sú zobrazené výsledky všetkých prevedených numerických simulácií. Hodnoty plášťového trenia boli získané z kontaktného prvku na rozhraní podložie-pilóta, v prípade posunov a osových pretvorení pilóty ide o hodnoty v reze A-A', ktorý bol vedený v ose symetrie.

#### 6.3.1 Namáhanie teplotou - ohrievaním

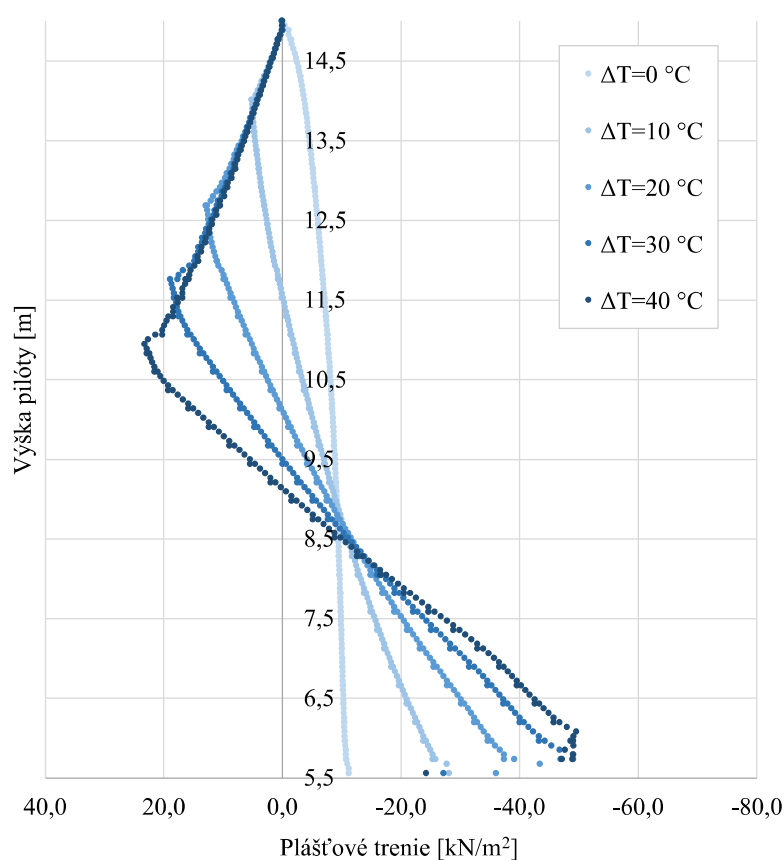
Získané priebehy plášťové trenia odpovedajú správaniu energopilóty vysvetlenému podľa P. J. Bourne-Webb a kolektív [26]. V hornej časti pilóty je trenie na plášti mobilizované v opačnom zmysle ako pri namáhaní len mechanickým zaťažením. Pri pôsobení termomechanického zaťaženia dochádza k tvorbe nulového bodu (bližší popis v kapitole 3), v ktorom nastáva zmena zmyslu jednotlivých veličín. Z uvedených grafov pre plášťové trenie na kontaktnom prvku bolo možné pozorovať posun tohto nulového bodu so zvyšujúcim sa mechanickým zaťažením. Konkrétne nastáva posun nulového bodu smerom k hlave pilóty. Poloha nulového bodu pre zaťaženie 250 kN sa nachádza približne v úrovni 8,5 m (pozri obrázok 6.3), pre zaťaženie 500 kN v mieste 8,75 m (pozri obrázok 6.6) a pre zaťaženie 1000 kN v časti približne 10,0 m (pozri obrázok 6.9).

Priebehy vertikálnych posunov v smere osi y verne popisujú nadvihnutie hlavy pilóty pri vnášaní vyšších teplôt a taktiež ukazujú opačný posun v päte pilóty (pozri obrázky 6.4, 6.7 a 6.10). So zvyšujúcim sa zaťažením nastáva väčší posun v päte pilóty, čo bolo zároveň predpokladaným správaním energopilóty podľa publikovaných štúdií. Dôvodom je, že s narastajúcim zaťažením je čoraz ťažšie docieľiť nadvihnutie hlavy pilóty, keďže

tomuto pohybu navyiac bráni šmykové napätie na plášti pilóty. Zároveň by sa dalo zhodnotiť, že pôsobenie teploty nemá tak enormný vplyv.

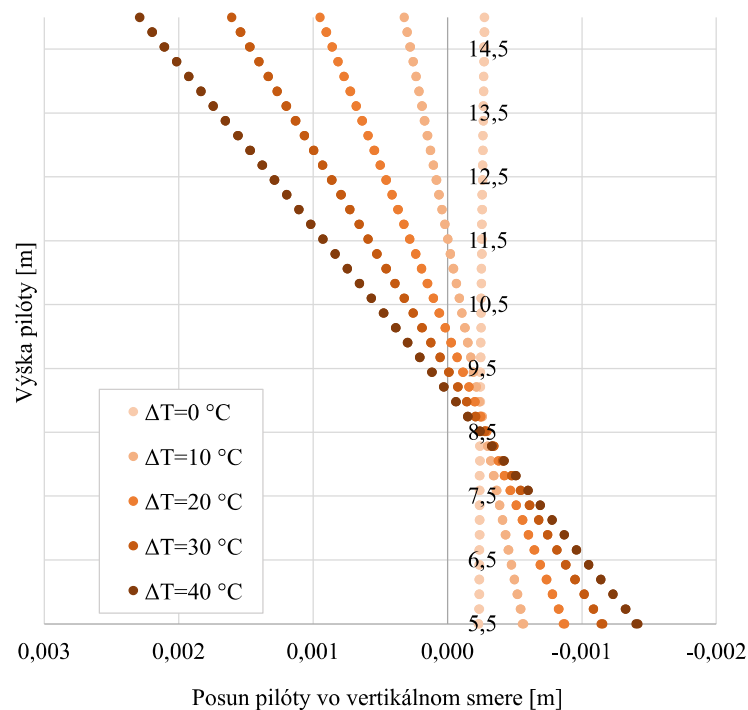
Obrázky 6.5, 6.8 a 6.11 zobrazujú, v tomto poradí, priebehy osových pretvorení v pilóte pre mechanické zaťaženie 250, 500 a 1000 kN a tepelné namáhanie popísané v časti 6.1.2. V hlave pilóty nastáva nárast počiatočného osového pretvorenia, ktoré narastá so zvyšujúcim sa mechanickým zaťažením. Osové pretvorenie v päte pilóty je nulové.

Podľa štúdie od N. Yavari a kolektív [59] však môžu byť uvedené hodnoty posunov pri procese ohrievania nadhodnotené, keďže na podobný jav poukázali pri numerickej simulácii na základe in situ testu od autorov P. J. Bourne-Webb a kolektív [26]. Vnášanie teploty pri simulácii prebehlo rovnakým spôsobom ako v tomto prípade. Bolo by vhodné tento jav objasniť na fyzikálnom či reálnom konštrukčnom prvku.

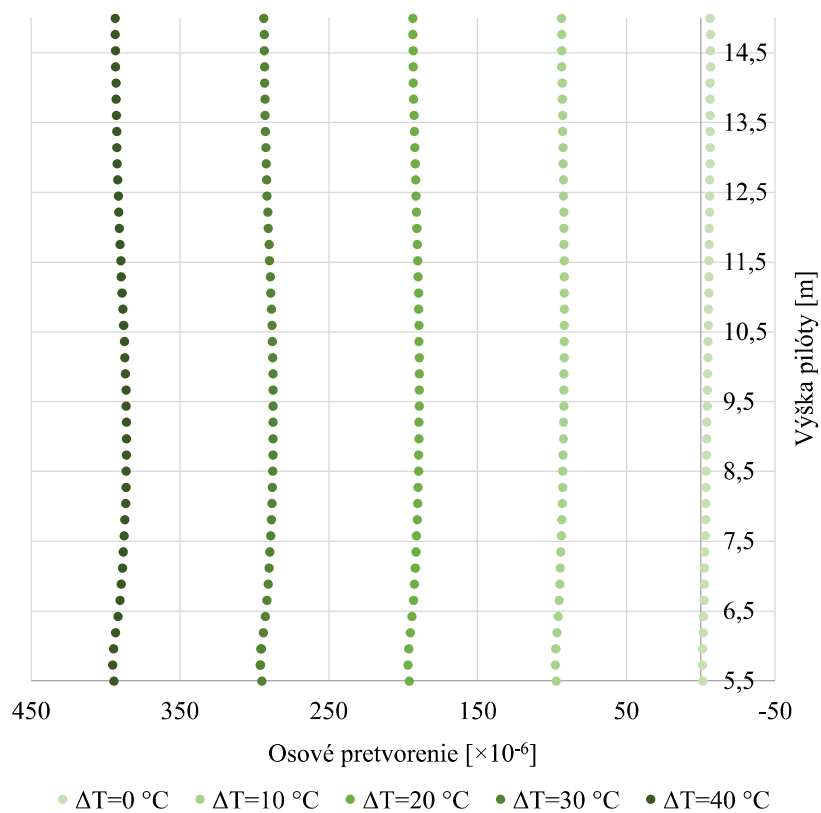


Obrázok 6.3: Priebeh plášťového trenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 250 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.

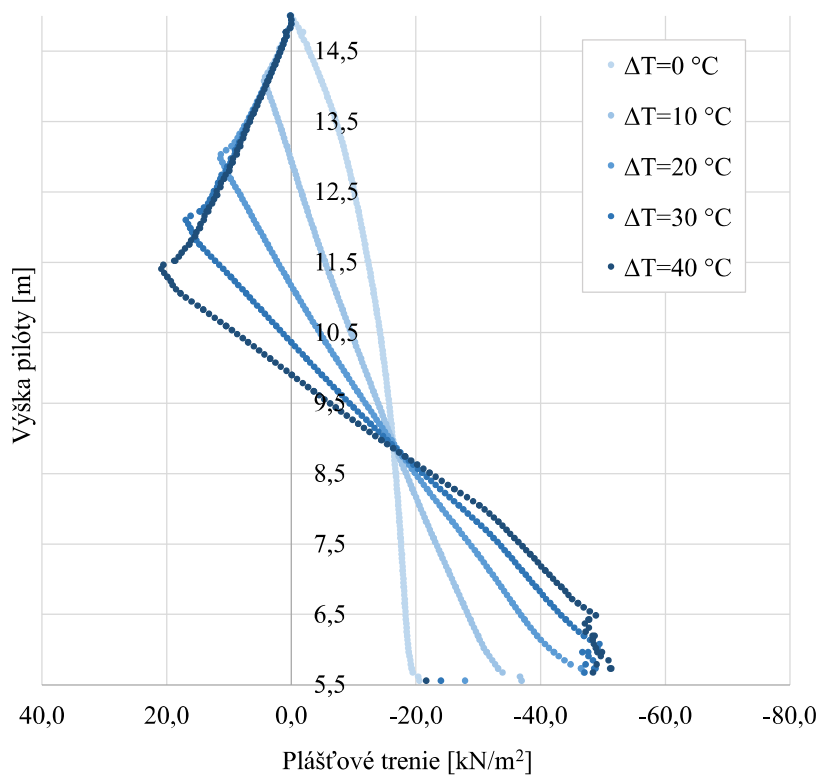




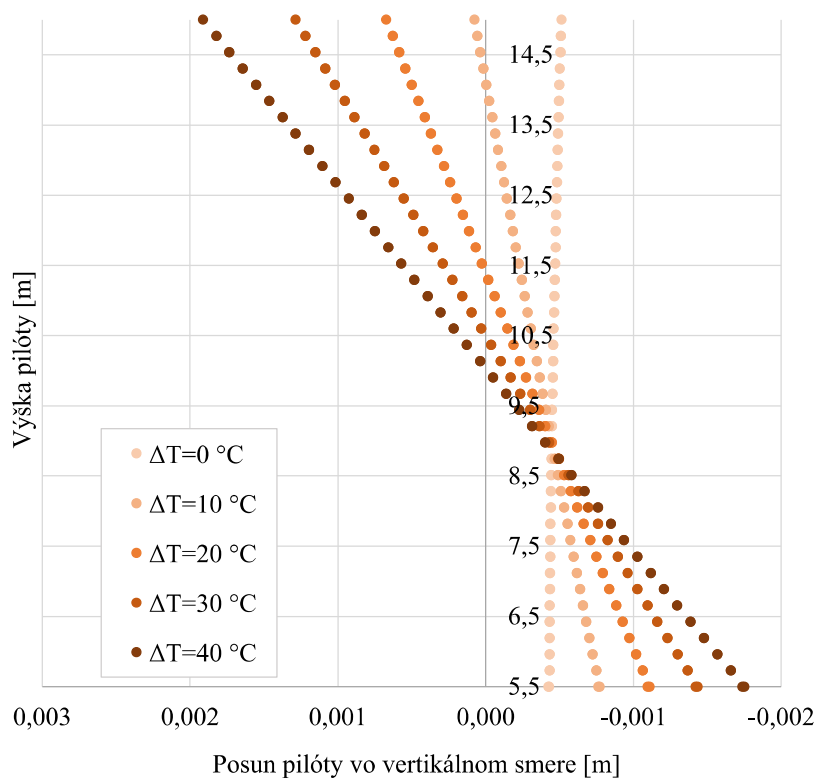
Obrázok 6.4: Priebeh posunov vo vertikálnom smere pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 250 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



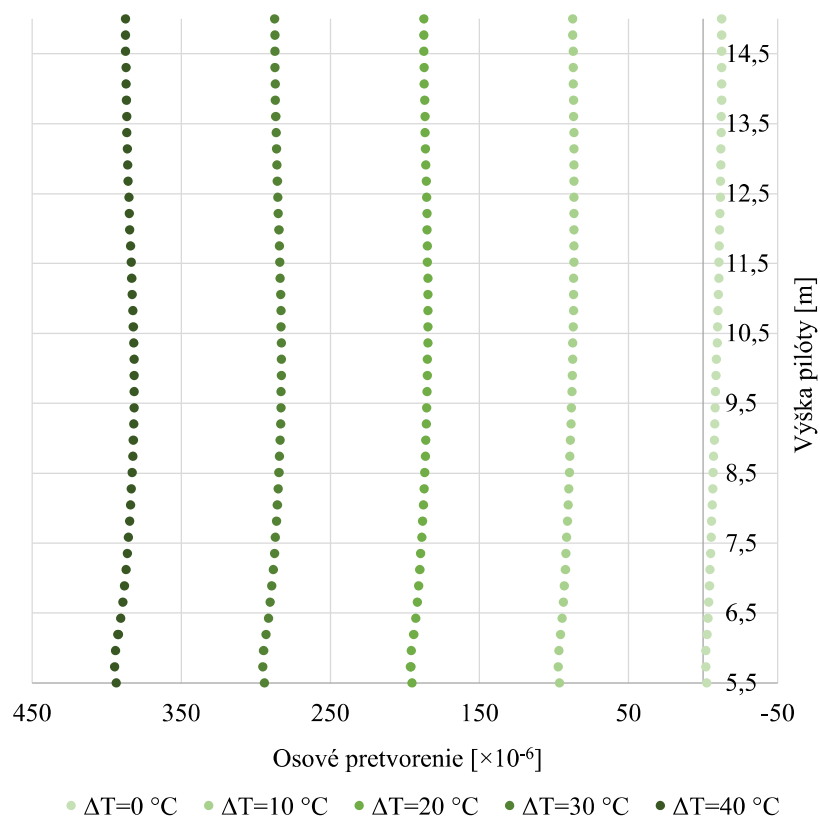
Obrázok 6.5: Priebeh osového pretvorenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 250 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



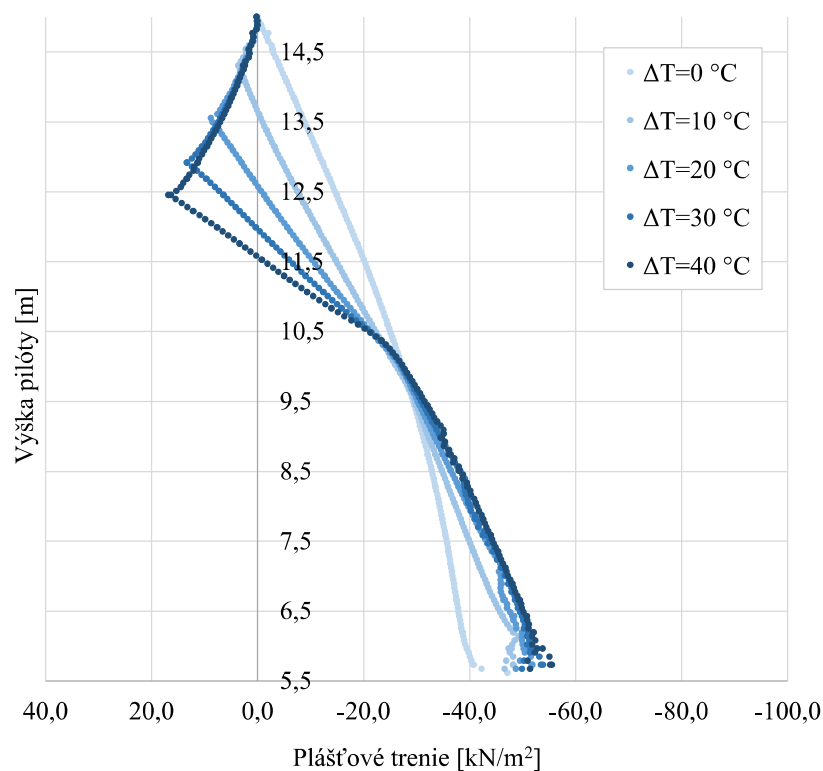
Obrázok 6.6: Priebeh plášťového trenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 500 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



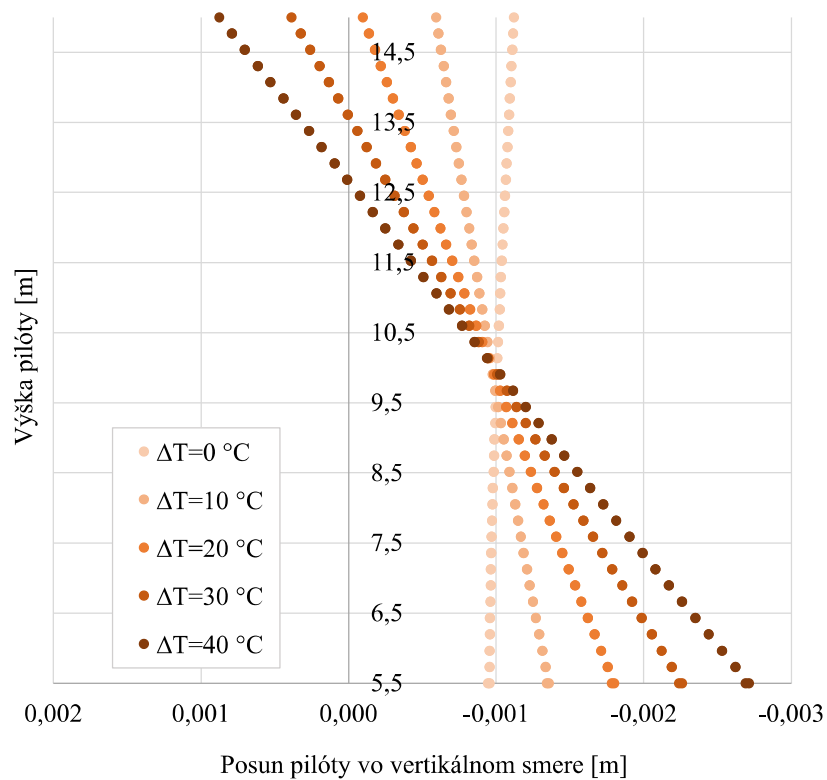
Obrázok 6.7: Priebeh posunov vo vertikálnom smere pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 500 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



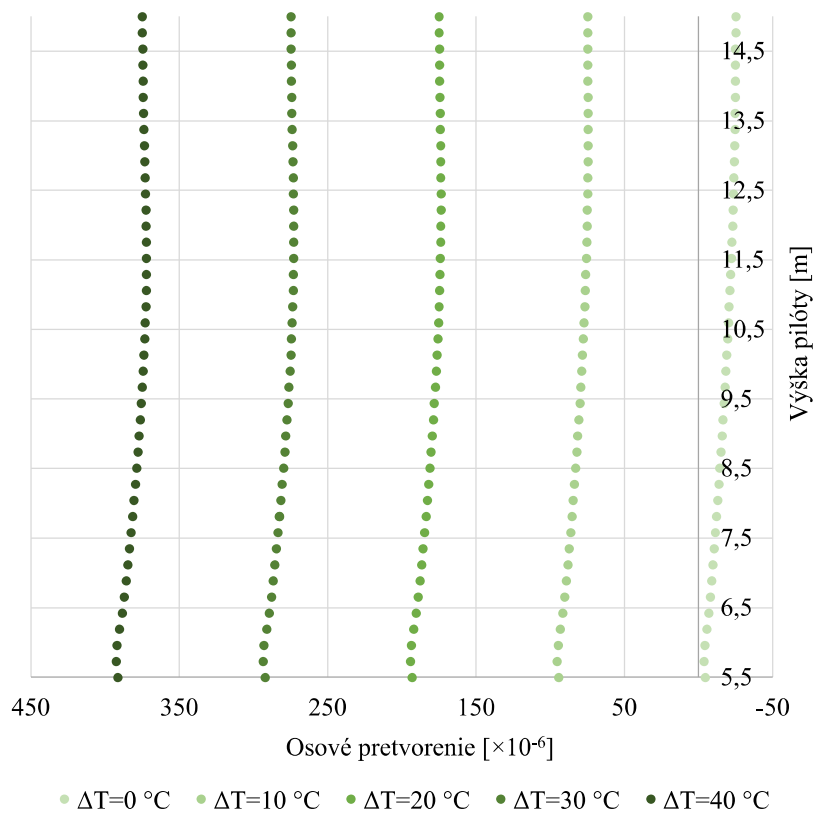
Obrázok 6.8: Pribeh osového pretvorenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 500 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



Obrázok 6.9: Pribeh plášťového trenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 1000 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.



Obrázok 6.10: Priebeh posunov pilóty vo vertikálnom smere pre mechanické zaťaženie 1000 kN a tepelné zaťaženie (ohrievanie) podľa legendy.



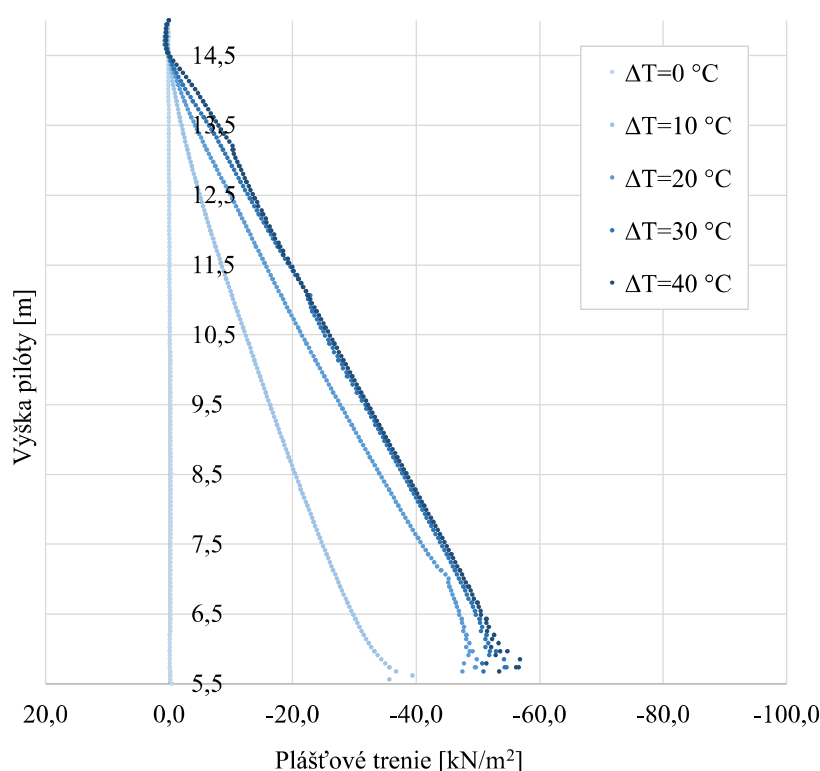
Obrázok 6.11: Priebeh osového pretvorenia pre pilótu namáhanú mechanickým zaťažením 1000 kN a tepelným namáhaním (ohrievanie) podľa legendy.

### 6.3.2 Čiastočne obmedzená energopilóta

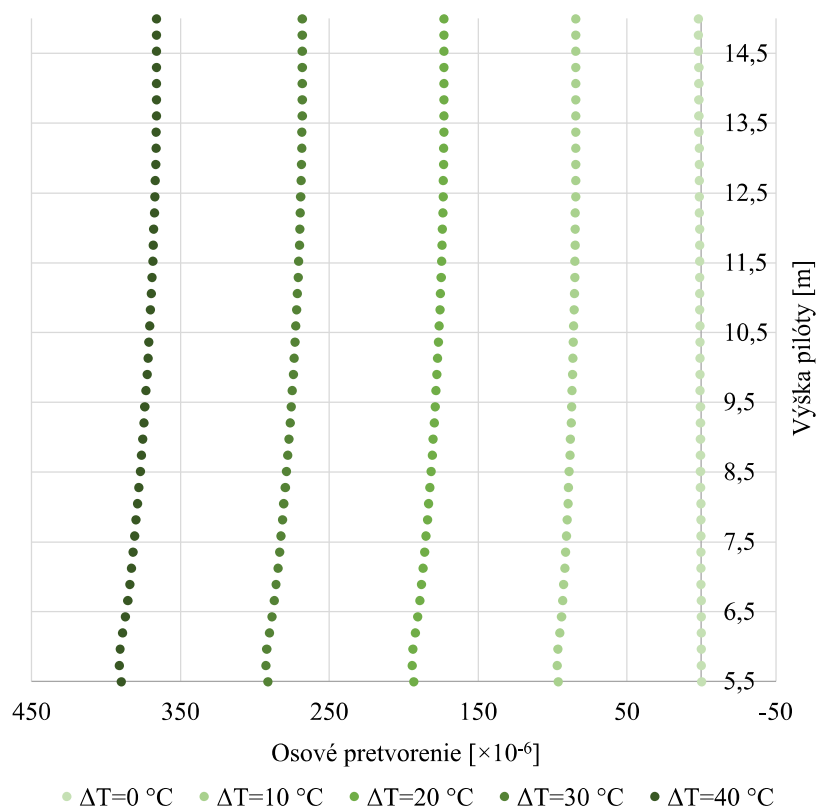
V časti 2 spôsobuje zamedzenie v hlave pilóty, že tzv. nulový bod je umiestnený v jej hlave. Dochádza tak k nárastu plášťového trenia pozdĺž drieku pilóty (pozri obrázok 6.12).

Priebehy zvislých posunov pilóty z tejto simulácie nie sú zobrazené, keďže k nim nedochádza z dôvodu ich obmedzenia. Na obrázku 6.13 sú zobrazené osovú pretvorenia, ktoré sa vyvinuli v pilóte.

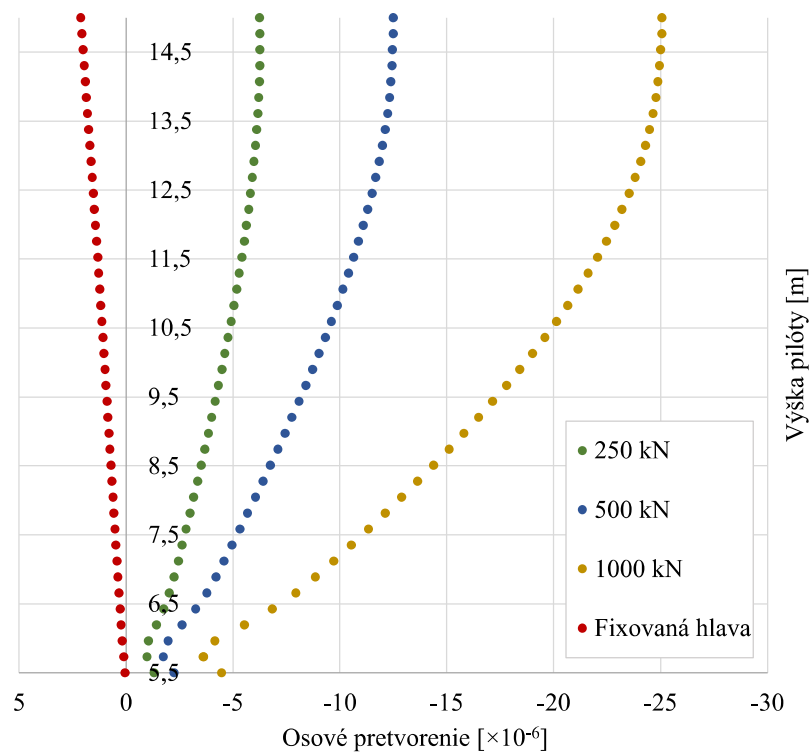
V tejto časti je uvedené aj krátke porovnanie priebehov osových napätí pre dotejšie prípady (mechanické zaťaženie 250, 500, 1000 kN a fixovanú hlavu pilóty). Obrázok 6.14 ukazuje osovú pretvorenia pre nulovú zmenu teploty, zatiaľ čo obrázok 6.15 pre maximálnu zmenu teploty  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ . Je možné povedať, že ide o porovnanie tejto veličiny pred vnesením vplyvu teploty a na konci tepelného namáhania. V hlave pilóty je možné pozorovať vývin väčších osových pretvorení. Najmarkantnejší rozdiel pretvorenia je vidieť pre pilótu, u ktorej bolo zamedzené zvislým posunom. Priebehy osových pretvorení odpovedajú priebehom uvedeným v [28] od kolektívu (B. L. Amatya, K. Soga, P. J. Bourne-Webb, T. Amis a L. Laloui).



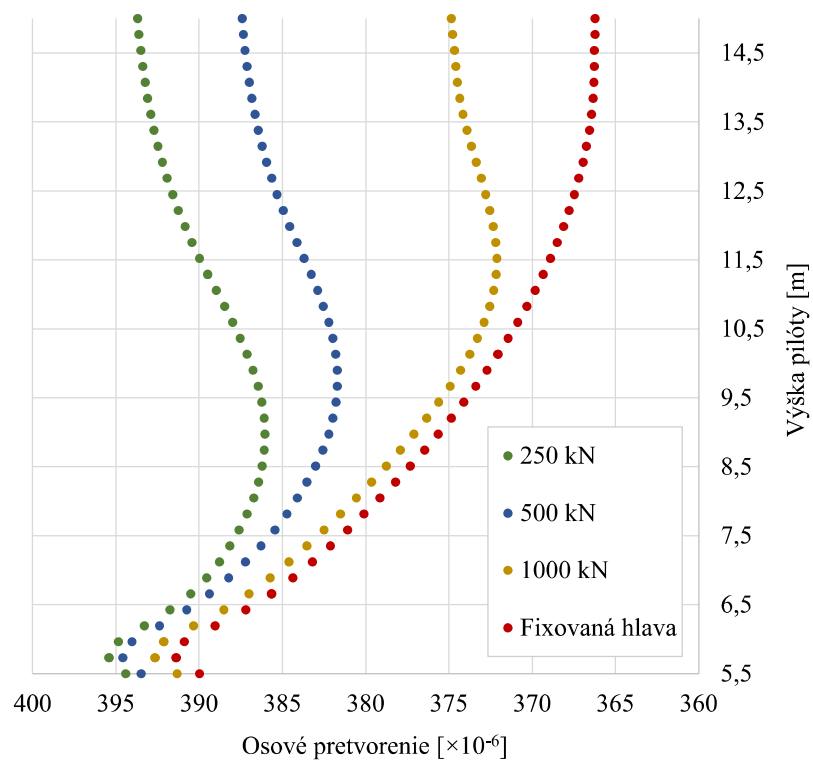
Obrázok 6.12: Priebeh plášťového trenia pre pilótu, u ktorej bolo definované obmedzenie v hlave pilóty pre blokáciu pohybu vo vertikálnom smere a namáhanie pôsobením teploty podľa legendy.



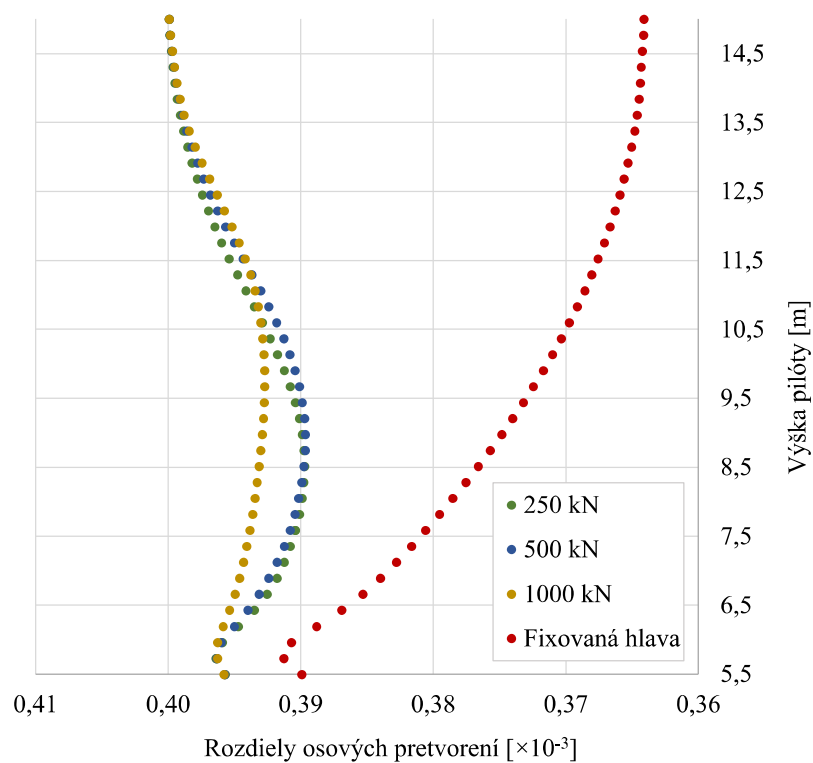
Obrázok 6.13: Priebeh osového pretvorenia pre pilótu, u ktorej bolo definované obmedzenie v hlave pilóty pre blokáciu pohybu vo vertikálnom smere a namáhanie pôsobením teploty podľa legendy.



Obrázok 6.14: Priebeh osového pretvorenia pre rôzne hodnoty mechanického zaťaženia (250, 500, 1000 kN; fixovaná hlava pilóty) pri zmene teploty  $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obrázok 6.15: Priebeh osového pretvorenia pre rôzne hodnoty mechanického zaťaženia (250, 500, 1000 kN; fixovaná hlava pilóty) pri zmene teploty  $\Delta T=40^\circ\text{C}$ .



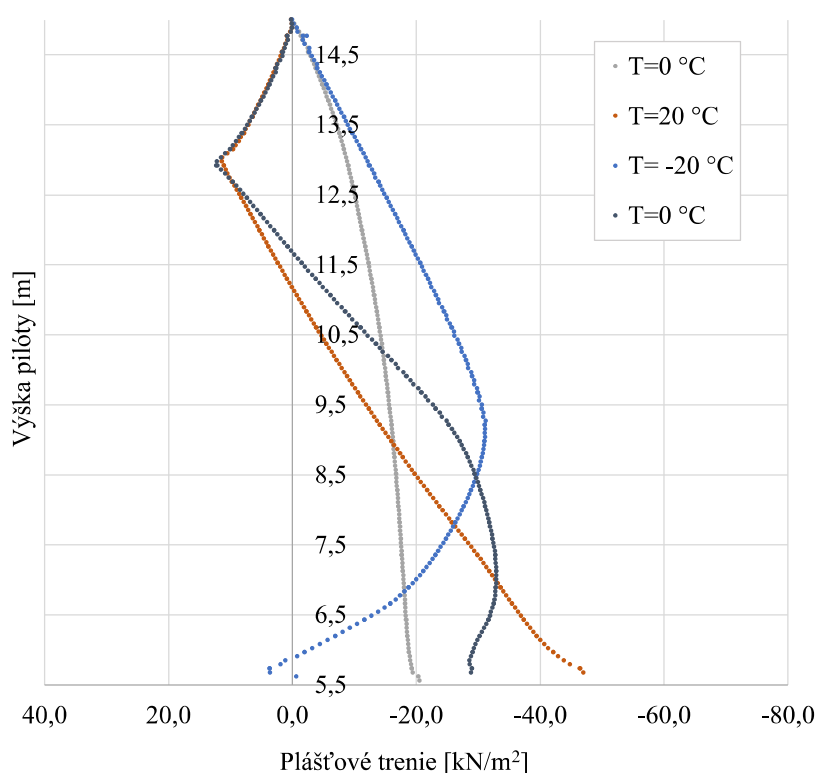
Obrázok 6.16: Priebeh rozdielov osového pretvorenia pre hodnoty z obrázkov 6.14 a 6.15.

### 6.3.3 Cyklické termo-mechanické namáhanie

Z predchádzajúcich kapitol vychádza poznatok, že energetická pilóta pôsobením zmeny teploty (ohrev) expanduje a pri ochladzovaní nastáva jej kontrakcia [26]. Tieto deje boli potvrdené aj v tejto simulácii.

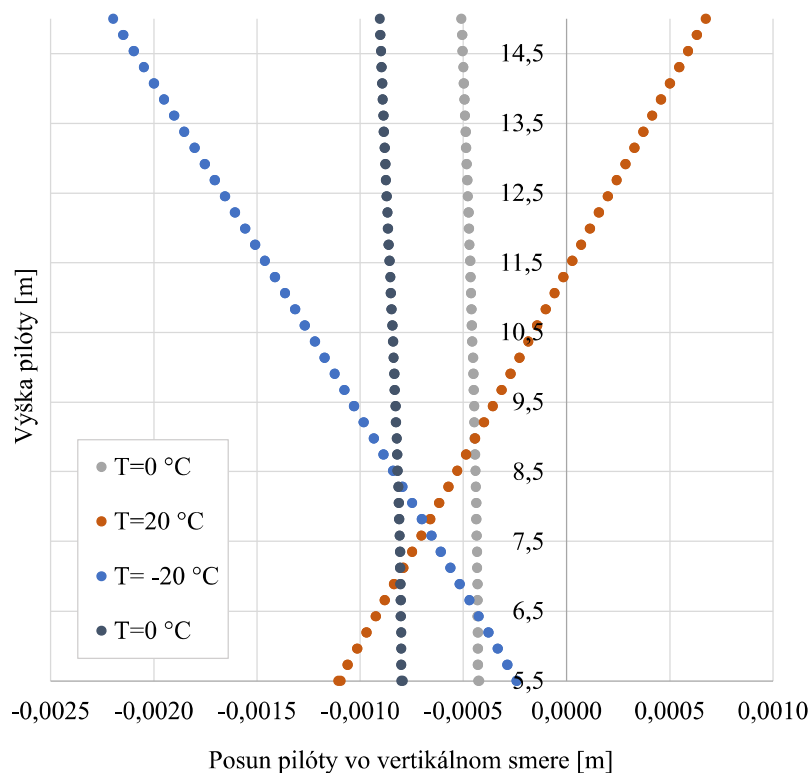
Pri ohrievaní pilóty došlo k jej rozpínaniu a mobilizácii plného plášťového trenia, pri procese ochladzovania naopak k zmršťovaniu pilóty a otočeniu plášťového trenia (pozri obrázok 6.17). I keď sa správanie v poslednom procese (návrat do hodnoty 0 °C) môže javiť neopodstatnene, je nutné uvažovať fakt, že počiatočný stav 0 °C a návrat do tejto hodnoty mohol byť ovplyvnený celkovým procesom ohrievania a ochladzovania. Na obrázkoch 6.19 a 6.20 je vidieť, že stav zvislých totálnych napätí v podloží je pre tieto nulové teploty rôzny. V hornej časti drieku pilóty bolo plášťové trenie pomerne malých hodnôt a mohlo by dôjsť k dosiahnutiu medzného plášťového trenia.

Celkové posuny vo vertikálnom smere zobrazuje obrázok 6.18, kde je vidieť zatlačenie pilóty do podložia pri pôsobení mechanického zaťaženia samostatne. Pri procese ohrievania, nastáva posun pilóty nahor a naopak, pri ochladzovaní nastáva posun smerom nadol, čo je opäť konzistentné z popísanými výsledkami publikovaných štúdií.



Obrázok 6.17: Pribeh plášťového trenia pre mechanické zaťaženie 500 kN a cyklické tepelné namáhanie podľa legendy.

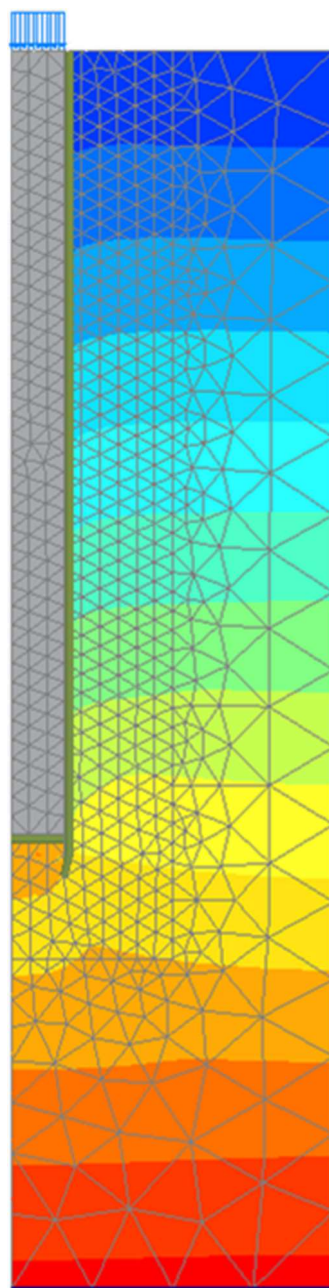
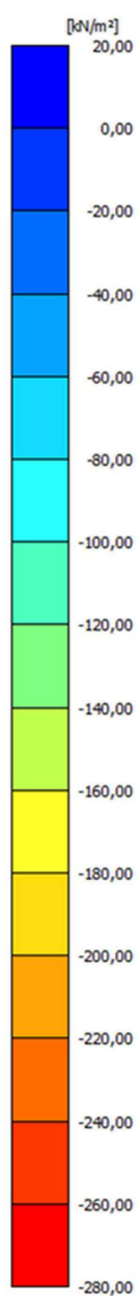




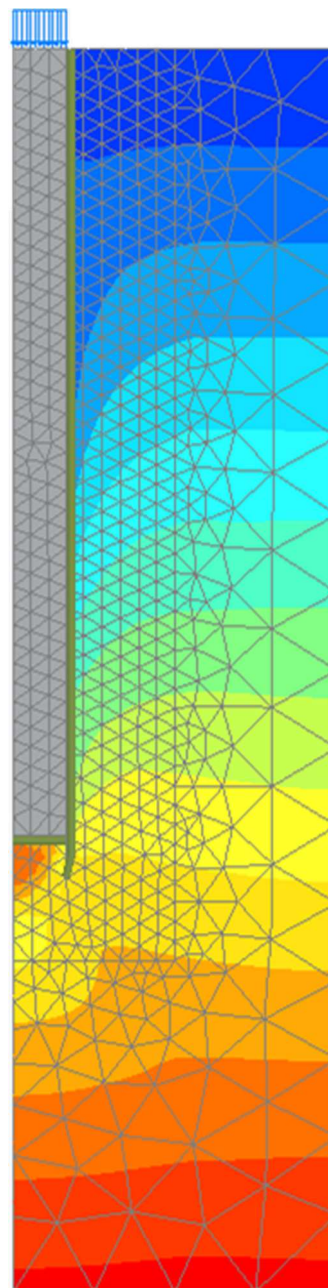
Obrázok 6.18: Priebeh posunu pilóty vo vertikálnom smere pre mechanické zaťaženie 500 kN a cyklické tepelné namáhanie podľa legendy.

Obrázky 6.19 a 6.20 zobrazujú plochy totálnych zvislých napätí  $\sigma_{yy}$  v pieskovom podloží. Úrovne napätí sú zobrazené pre mechanické zaťaženie 500 kN, pri rovnakej teplote 0 °C. Obrázok 6.19 zobrazuje plochy napätí pre teplotu 0 °C pred samotným namáhaním teplotou, obrázok 6.20 po tepelnom cykle (0 °C → 20 °C → -20 °C → 0 °C). Z týchto priebehov je vidieť, že stav napätosti v zemine sa zmenil pôsobením teploty hlavne v oblasti plášťa pilóty. Pre bližšie porozumenie správania podložia by bolo potrebné do výpočtu zahrnúť prúdenie tepla aj v zemine.

Na základe vykonanej numerickej simulácie a následnej diskusií či porovnaní výsledkov je možné zhodnotiť, že tento zjednodušený spôsob vnesenia vplyvu teploty v pilóte je taktiež možným spôsobom.



Obrázok 6.19: Plochy zvislých totálnych napätí v podloží pre mech. zaťaženie 500 kN a počiatočnú teplotu 0 °C (pred cyklickým namávaním od teploty).



Obrázok 6.20: Plochy zvislých totálnych napätí v podloží pre mech. zaťaženie 500 kN a konečnú teplotu 0 °C po namáhaní tepelným cyklom.

---

## 7 ZÁVER

Energetické pilóty tvoria komplexný prvok, v ktorom je potrebné zamerať sa na energetickú efektívnosť aj geotechnické správanie po dobu životnosti konštrukcie. Je nutné zohľadniť prúdenie teploty v pilóte aj v zemine spoločne so základným pozorovaním statických vlastností. Združenú analýzu takéhoto systému je pomerne náročné správne opísať.

Bakalárska práca sa postupne venuje bodom daným v zadaní práce. Súčasťou dôkladnej rešerše problematiky energetických základových konštrukcií je predstavenie systému energopilót, popis správania a uvedenie faktorov ovplyvňujúcich toto správanie. Na základe uvedených štúdií bolo poukázané, že okolité zemné prostredie aj pilóta majú vplyv na správanie aj energetickú odozvu systému (bližšie v kapitole 4). V práci sú uvedené možné spôsoby skúmania energopilót – analytické, experimentálne a numerické, ako aj stručný chronologický prehľad vybraných štúdií (kapitola 5). Cieľom pozorovaní bolo priblíženie správania pilót namáhaných navyiac zaťažením od teploty a vplyv teploty na statickú odozvu. Podľa doterajších poznatkov z prevedených in situ testov, laboratórnych meraní a numerických simulácií sú predmetom skúmania najčastejšie tieto veličiny – zvislý posun pilóty, plášťové trenie, osové pretvorenie v pilóte, zvislé napätie a teploty v pilóte aj v podloží. Záverečná časť bakalárskej práce sa venovala jednoduchej simulácii energetickej pilóty modelovanej v programe Plaxis 2D. Vnášanie teploty v tomto prípade nebolo aplikované, vnesené boli iba pretvorenia pilóty naznačujúce predpokladané pôsobenie zvýšenej resp. zníženej teploty. Simulácia ukázala, že vnesenie vplyvu teploty pomocou pretvorenia je správnym, no zároveň zjednodušeným spôsobom.

Na základe doterajších štúdií je možné povedať, že vzťah medzi napätím a pretvorením pilóty je prevažne vratný. Pri procese ohrievania energopilóty dochádza k jej dilatácií (nadvihnutiu hlavy pilóty) a vývinu dodatočných napätí, naopak pri procese ochladzovania dochádza k zmršťovaniu pilóty (poklesu hlavy pilóty). Tieto javy boli potvrdené pri viacerých experimentálnych aj numerických observáciách.

Ďalej sa ukázalo, že množstvo mechanického zaťaženia má veľký vplyv na celkové správanie energopilóty. Pri menších zaťaženiach prevláda efekt zmeny teploty na správanie pilóty. Pri väčších hodnotách mechanického zaťaženia je efekt od teploty menší, prevláda pôsobenie mechanického zaťaženia a nastáva vývin sadnutí pilóty.

Viacero experimentov skúmalo časovú odozvu podložia v závislosti na vzdialenosti od zdroja tepla. Častokrát je nutný minimálne dvojnásobne dlhší časový interval na navrátenie počiatočných podmienok v podloží.

Z hľadiska numerických simulácií je dôležité vybrať vhodný typ konštitučného modelu, ktorý dokáže verne reprodukovat' správanie energopilót – môže totiž dochádzať k nadhodnoteniu veličín. Vo všeobecnosti dokážu numerické simulácie veľmi uspokojivo reprodukovat' správanie energetických pilót, keďže veľké množstvo experimentálnych meraní bolo podporených aj numericky. Vo väčšine prípadov vykazovali štúdie relatívne konzistentné výsledky.

---

V rámci budúcich štúdií by bolo vhodné previesť dôkladnú parametrickú štúdiu pre vytvorený model, aplikovať pôsobenie tepelného namáhania adekvátnejším spôsobom, a teda uvažovať prúdenie tepla v samotnom zemnom podloží. Následné štúdium väčšieho počtu cyklov pri termo-mechanickom namáhaní a ich vplyv na životnosť konštrukcie i únosnosť podložia by bolo taktiež zaujímavým experimentom.

---

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] LALOUÏ, Lyesse, Mathieu NUTH a Laurent VULLIET. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* [online]. 2006, **30**(8), 763-781 [cit. 2021-05-03]. ISSN 0363-9061. Dostupné z: doi:10.1002/nag.499
- [2] Piled Foundations Explained [online]. London: Castle Media, 2018 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.self-build.co.uk/piled-foundations-explained/>
- [3] TRS, Milan. Využívání stavebních konstrukcí budov pro ukládání energie [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2008 [cit. 2021-02-20]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/4977-vyuzivani-stavebnich-konstrukci-budov-pro-ukladani-energie#>
- [4] POPIEL, C.O, J WOJTKOWIAK a B BIERNACKA. Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. ELSEVIER, 2001, **25**(5), 301-309 [cit. 2021-05-22]. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/S0894-1777(01)00078-4
- [5] Systémová technika RAUGEO pro využití zemního tepla: Technická informace 827600 [online]. Čestlice: REHAU s.r.o., 2007 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.rehau.com/downloads/566024/technick%C3%A1-informace-rehau-raugeo.pdf>
- [6] Geothermal piles [online]. London: Balfour Beatty [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.balfourbeatty.com/expertise/ground-engineering/technical-data-sheets/piling-and-foundations/>
- [7] SUTMAN, Melis. Thermo-Mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling. Blacksburg, Virginia, 2016. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [8] ABUEL-NAGA, H., M.I.N. RAOUF, A.M.I. RAOUF a A.G. NASSER. Energy piles: Current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics* [online]. 2015, **2**(4), 195-210 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/envgeo.13.00019>
- [9] ADAM, D., M. RAO SINGH a PG. RANJITH, A. BOUAZZA, ed. Direct Geothermal Energy from Geostructures. In: BUDD, A.R. Proceedings of the 2011 Australian Geothermal Energy Conference. Melbourne: Geoscience Australia, 2011, s. 21-24. ISBN 978-1-921954-56-6. ISSN 1448-2177.
- [10] Energy piles. TOMLINSON, Michael a John WOODWARD. *Pile Design and Construction Practice* [online]. 5. London, New York: Taylor & Francis, 2008, s. 474-475 [cit. 2021-02-24]. ISBN 0-203-96429-2.

- 
- [11] Thermal Pile: Design, Installation & Materials Standards [online]. Milton Keynes: Ground Source Heat Pump Association, 2012 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: [https://www.gshp.org.uk/GSHP\\_Standards.html](https://www.gshp.org.uk/GSHP_Standards.html)
- [12] Energetické piloty [online]. Liberec: GE-TRA s.r.o., 2020 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.ge-tra.cz/problematiky/energeticke-piloty>
- [13] RYBACH, L. Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps. SAYIGH, A. Comprehensive Renewable Energy [online]. 1. Zurich: ELSEVIER, 2012, s. 189-207 [cit. 2021-02-24]. ISBN 978-0-08-087873-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080878720007046>
- [14] FADEJEV, Jevgeni, Raimo SIMSON, Jarek KURNITSKI a Fariborz HAGHIGHAT. A review on energy piles design, sizing and modelling. *Energy [online]*. ELSEVIER, 2017, (122), 390-407 [cit. 2021-02-26]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097).
- [15] LIU, Wenbo a Minghai XU. Research Progress of Pile Heat Exchangers in Ground Source Heat Pump System. *Procedia Engineering [online]*. ELSEVIER, 2017, 205, 3775-3781 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.141](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.141)
- [16] GAO, Jun, Xu ZHANG, Jun LIU, Kui Shan LI a Jie YANG. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering [online]*. 2008, **28**(17-18), 2295-2304 [cit. 2021-05-23]. ISSN 13594311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.01.013](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.01.013)
- [17] Geothermal pile. In: Designing Building Wiki [online]. Buckland: Designing Building Wiki, 2020 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:Geothermalpile.jpg>
- [18] BRANDL, H. Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. In: *Procedia Engineering: 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 57. Vilnius: ELSEVIER, 2013, s. 9-18. ISSN 1877-7058.
- [19] TRS, Milan. Energetické piloty aplikované do praxe. Technika. TechPark, 2011, 4(1-2), 22.
- [20] Praha, 12 LOFTS Bubeneč. In: HOCHTIEF [online]. Praha: ABRA Publisher, 2014 [cit. 2021-05-1]. Dostupné z: <https://www.hochtief.cz/nase-projekty/referencni-projekty/bytove/praha-12-lofts-bubenec>
- [21] Energetické základy vytápí a chladí AZ Tower v Brně. GEROTop [online]. Liberec: GEROTop, 2013 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.gerotop.cz/az-tower-brno>
- [22] BUDKOVSKÝ, Jan. Geotermální výměníky - Přidaná hodnota základových prvků. *Zakládání*. Zakládání staveb, a.s., 2015, **27**(3), 10-11.
-

- 
- [23] Ingsteel zrealizuje opláštenie A-Z Tower. In: ASB [online]. Bratislava: JAGA Group, 2012 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/aktualne/udalosti/ingsteel-zrealizuje-oplastenie-a-z-tower>
- [24] MASOPUST, Jan. Vrtané piloty. Prvé. Česko: Čeněk a Ježek, 1994. ISBN 80-238-2755-3.
- [25] Komplexní chování silně zatížených konstrukcí v interakci s podloží. Katedra betonových a zděných konstrukcí [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2016 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/2016/pomucky\\_O02K\\_zalozeni\\_silne\\_zatizenych\\_konstrukci.pdf](https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/2016/pomucky_O02K_zalozeni_silne_zatizenych_konstrukci.pdf)
- [26] BOURNE-WEBB, P.J., B. AMATYA, K. SOGA, T. AMIS, C. DAVIDSON a P. PAYNE. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique* [online]. 2009, **59**(3), 237-248 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: doi:10.1680/geot.2009.59.3.237
- [27] NGUYEN, Van-Tri. Thermal and thermo-mechanical behavior of energy piles. Paris, 2017, 169 s. Dissertation. Université Paris-Est. Vedoucí práce M. Anh Minh Tang.
- [28] AMATYA, B.L., K. SOGA, P.J. BOURNE-WEBB, T. AMIS a L. LALOU. Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles. *Géotechnique* [online]. 2012, **62**(6), 503-519 [cit. 2021-04-05]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:10.1680/geot.10.P.116
- [29] BATINI, Niccolò, Alessandro F. ROTTA LORIA, Paolo CONTI, Daniele TESTI, Walter GRASSI a Lyessse LALOU. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions. *Applied Thermal Engineering* [online]. ELSEVIER, 2015, **86**, 199-213 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.050
- [30] GHASEMI-FARE, Omid a Prasenjit BASU. An annular cylinder source model for heat transfer through energy piles. Conference Paper [online]. 2013 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/264084825>
- [31] YOU, Tian a Hongxing YANG. Influences of different factors on the three-dimensional heat transfer of spiral-coil energy pile group with seepage. *International Journal of Low-Carbon Technologies* [online]. Oxford Academic, 2020, **15**(3), 458-470 [cit. 2021-05-26]. ISSN 1748-1317. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa006
- [32] BEJAN, Adrian a Allan D. KRAUS. Heat transfer handbook [online]. 1. Hoboken: Wiley, 2003 [cit. 2021-05-22]. ISBN 04-713-9015-1. Dostupné z: [https://books.google.sk/books?id=d4cgNG\\_IUq8C&pg=PP5&lr=&hl=sk&source=gbv\\_selected\\_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false](https://books.google.sk/books?id=d4cgNG_IUq8C&pg=PP5&lr=&hl=sk&source=gbv_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false)
- [33] AKROUCH, Ghassan Anis, Marcelo SÁNCHEZ a Jean-Louis BRIAUD. Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta Geotechnica*
-

- 
- [online]. 2014, **9**(3), 399-412 [cit. 2021-05-26]. ISSN 1861-1125. Dostupné z: doi:10.1007/s11440-014-0312-5
- [34] KIM, Kook-Han, Sang-Eun JEON, Jin-Keun KIM a Sungchul YANG. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research [online]*. ELSEVIER, 2003, **33**(3), 363-371 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1
- [35] PARK, Sangwoo, Chihun SUNG, Kyoungsik JUNG, Byonghu SOHN, Alexis CHAUCHOIS a Hangseok CHOI. Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. *Applied Thermal Engineering [online]*. ELSEVIER, 2015, **90**, 1061-1071 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.044
- [36] GASHTI, Ehsan Hassani Nezhad, Mikko MALASKA a Kauko KUJALA. *Evaluation of Thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heating/cooling operations*. Engineering Structures [online]. ELSEVIER, 2014, **75**, 363-373 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.018
- [37] JAEGER, J. G. Some problems involving line sources in *conduction* of heat. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science [online]. 1944, **35**(242), 169-179 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1080/14786444408521476
- [38] INGERSOLL, L. R., O. J. ZOEBEL a A. C. INGERSOLL. Heat Conduction - with Engineering, Geological, and Other Applications. 1. Madison: University of Wisconsin Press, 1954. ISBN 0598474358.
- [39] CARSLAW, Horatio Scott a John Conrad JAEGER. Conduction of *heat* in solids. 2. Oxford: Clarendon Press, 1959. ISBN 9780198533689.
- [40] ESKILSON, Per. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Sweden, 1987. Doctoral Dissertation. University of Lund.
- [41] ZENG, H. Y., N. R. DIAO a Z. H. FANG. A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. *Asian Research [online]*. 2002, **31**(7), 558-567 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/htj.10057
- [42] MAN, Y., H. YANG, N. DIAO, J. LIU a Z. FANG. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. 2010, **53**(13-14), 2593-2601 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.001
- [43] LI, M. a A. C. K. LAI. New temperature response functions (G functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory. Energy [online]. ELSEVIER, 2012, **38**(1), 255-263 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.004
-



- 
- [44] LAI, A. C. K. Heat-source solutions to heat *conduction* in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers. *Applied Energy* [online]. ELSEVIER, 2012, 96, 451-458 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.084>
- [45] LAMARCHE, L. a B. BEAUCHAMP. New solutions for *the* short-time analysis of geothermal vertical boreholes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2007, 50(7-8), 1408-1419 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.007>
- [46] BANDOS, Tatyana V., Álvaro MONTERO, Esther FERNÁNDEZ, Juan Luis G. SANTANDER, José María ISIDRO, Jezabel PÉREZ, Pedro J. Fernández de CÓRDOBA a Javier F. URCHUEGUÍA. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* [online]. 2009, 38(2), 263-270 [cit. 2021-05-17]. ISSN 03756505. Dostupné z: doi:[10.1016/j.geothermics.2009.01.003](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.01.003)
- [47] BOZIS, D., K. PAPAKOSTAS a N. KYRIAKIS. *On* the evaluation of design parameters effects on the heat transfer efficiency of energy piles. *Energy and Buildings* [online]. 2011, 43(4), 1020-1029 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.028](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.028)
- [48] AKROUCH, G. A., M. SÁNCHEZ a J.-L. BRIAUD. An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils. *Computers and Geotechnics* [online]. 2016, 71, 207-220 [cit. 2021-05-17]. ISSN 0266-352X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.08.009>
- [49] KALANTIDOU, A., A.M. TANG, J.-M. PEREIRA a G. HASSEN. Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model. *Géotechnique* [online]. 2012, 62(11), 1047-1051 [cit. 2021-05-01]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:[10.1680/geot.11.T.013](https://doi.org/10.1680/geot.11.T.013)
- [50] SINGH, Rao Martand, Abdelmalek BOUAZZA a Bill WANG. Near-field *ground* thermal response to heating of a geothermal energy pile: Observations from a field test. *Soils and Foundations* [online]. ELSEVIER, 2015, 55(6), 1412-1426 [cit. 2021-05-01]. ISSN 0038-0806. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.007>
- [51] ANALYSES OF THE AXIAL LOAD TESTS AT THE ROUTE 351 *BRIDGE* [online]. Washington D.C.: Federal Highway Administration, 2012 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04043/07.cfm>
- [52] Axially Loaded Piles [online]. Toronto: Rocscience, 2018 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [https://www.rocscience.com/help/rspile/pdf\\_files/theory/RSPile\\_-\\_Axially\\_Loaded\\_Piles\\_Theory.pdf](https://www.rocscience.com/help/rspile/pdf_files/theory/RSPile_-_Axially_Loaded_Piles_Theory.pdf)
-

- 
- [53] DIAS, Tiago Gerheim Souza a Adam BEZUIJEN. Load-Transfer Method *for* Piles under Axial Loading and Unloading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* [online]. 2018, **144**(1) [cit. 2021-04-08]. ISSN 1090-0241. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001808
- [54] DE WECK, Olivier a Il Yong KIM. Finite Element *Method*. In: Massachusetts Institute of Technology [online]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [http://web.mit.edu/16.810/www/16.810\\_L4\\_CAE.pdf](http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf)
- [55] WANG, Wenqing, Georg KOSAKOWSKI a Olaf KOLDITZ. A parallel *finite* element scheme for thermo-hydro-mechanical (THM) coupled problems in porous media. *Computers and Geosciences* [online]. ELSEVIER, 2009, **35**(8), 1631-1641 [cit. 2021-05-19]. ISSN 00983004. Dostupné z: doi:10.1016/j.cageo.2008.07.007
- [56] BRINKGREVE, R. B. J., S. KUMARSWAMY, W. M. SWOLFS a F. FORIA, ed. PLAXIS 2018. 1. Netherlands: Plaxis bv, 2018. ISBN 978-90-76016-24-5.
- [57] WU, Nanwangzi a Yixiang GAN. Modelling Thermo-mechanical Behaviour of *Geothermal* Energy Piles under Cyclic Loading [online]. In: . [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: [http://drgan.org/wp-content/uploads/2017/12/iCGMGE2017\\_Wu.pdf](http://drgan.org/wp-content/uploads/2017/12/iCGMGE2017_Wu.pdf)
- [58] MAIORANO, R. M. S., G. MARONE, G. RUSSO a L. DI GIROLAMO. Experimental behavior and numerical analysis of energy piles. In: *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019* [online]. Reykjavik: ECSMGE, 2019, s. 819-822 [cit. 2021-05-15]. ISBN 978-9935-9436-1-3. Dostupné z: doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0819
- [59] YAVARI, N., A. M. TANG, J.-M. PEREIRA a G. HASSEN. A simple method for numerical modelling of mechanical behaviour of an energy pile. *Géotechnique Letters* [online]. 2014, **4**(2), 119-124 [cit. 2021-05-02]. ISSN 2045-2543. Dostupné z: doi:dx.doi.org/10.1680/geolett.13.00053
- [60] YAVARI, Neda, Anh Minh TANG, Jean-Michel PEREIRA a Ghazi HASSEN. Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica* [online]. 2014, **9**(3), 385-398 [cit. 2021-05-27]. ISSN 1861-1125. Dostupné z: doi:10.1007/s11440-014-0310-7
- [61] SINGH, R. M., A. BOUAZZA, B. WANG, C. H. HABERFIELD, S. BAYCAN a Y. CARDEN. Thermal and Thermo-Mechanical Response of a Geothermal Energy Pile. *Proceedings World Geothermal Congress 2015* [online]. 2015 [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://www.geothermal-energy.org/explore/our-databases/conference-paper-database/>
- [62] YAVARI, N., A. M. TANG, J. M. PEREIRA a G. HASSEN. Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay. *Géotechnique* [online]. 2016, **66**(11), 878-887 [cit. 2021-05-27]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:10.1680/jgeot.15.T.026
-

- 
- [63] GAWECKA, Klementyna A., David M. G. TABORDA, *David* M. POTTS, Wenjie CUI, Lidija ZDRAVKOVIĆ a Muhamman S. HAJI KASRI. Numerical modelling of thermo-active piles in London Clay. *Geotechnical Engineering* [online]. ice publishing, 2017, 170(3), 201-219 [cit. 2021-05-27]. ISSN 1353-2618. Dostupné z: [doi:dx.doi.org/10.1680/jgeen.16.00096](https://doi.org/10.1680/jgeen.16.00096)
- [64] LV, Zhixiang, Gangqiang KONG, Hanlong LIU a Lyesse LALOUI. Thermal response test of floating energy pile in China: Case study [online]. 2018 [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: [https://seg2018.epfl.ch/wp-content/uploads/2018/08/EA\\_190\\_Kong.pdf](https://seg2018.epfl.ch/wp-content/uploads/2018/08/EA_190_Kong.pdf)
- [65] Thermo-mechanical behaviour of floating energy pile groups in sand. *Journal of Zhejiang University - SCIENCE A* [online]. 2018, 19, 638-649 [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1631/jzus.A1700460](https://doi.org/10.1631/jzus.A1700460)